

Untersuchungen zum Blechdruck für Metallverpackungen

am Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

M.Sc. Stephan Behnke

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Darmstadt, 2019

D17

Stephan Behnke

Untersuchungen zum Blechdruck für Metallverpackungen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2019

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-92490

Tag der Einreichung: 12.06.2019

Tag der mündlichen Prüfung: 16.10.2019

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung

Im stetig wachsenden Markt für Verpackungen besteht zwischen den nach Werkstoffen klassifizierten Marktsegmenten eine indirekte Wettbewerbssituation, in welcher ein Streben nach Expansion zu Verpackungsformen anderer Werkstoffgruppen zu beobachten ist. Der Bedruckstoff Metall ist ein Werkstoff, welcher gegenüber Kunststoff, Glas und Kartonagen über eine ganze Reihe Besonderheiten in seinen Eigenschaften verfügt, mit denen Potenziale zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit erzielt werden können. Um diesem Ziel Rechnung zu tragen, widmet sich diese Arbeit der wissenschaftlichen Aufbereitung von Metallverpackungen respektive des Blechdrucks. Neben der Klassifikation der enormen Produktvielfalt, den spezifischen Anforderungen an Metallverpackungen und den eingesetzten Produktionslinien und Linienkonfigurationen finden auch die eingesetzten Materialien Weißblech, Lacke und Farbe sowie verfahrensspezifische Besonderheiten Berücksichtigung. Der experimentelle Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung Weißblech direkt mit UV-Farben bedrucken zu können, da dies das Potenzial einer Verdichtung drucktechnischer Prozesse bietet. Neben einer begleitenden Farbentwicklung und der Analyse eingesetzter Weißbleche sowie der Einbeziehung teilweise normierter Prüfmethode zur Umformbarkeit spielt auch die Untersuchung von Oberflächeneigenschaften und deren mögliche Modifikation eine gewichtige Rolle. Aufgrund der Schwierigkeiten eine ausreichende Haftung UV-basierender Farbsysteme auf Weißblechen zu erzielen, wird erstmals die Wirkung einer Vorbehandlung von Weißblech mittels UV-Strahlen verschiedener Wellenspektren eingehend experimentell untersucht. Mithilfe der Messung der Kontaktwinkel und der Ermittlung von Oberflächenenergien werden die durch die UV-Strahleneinwirkung ausgelösten Benetzungsmodifikationen der Weißbleche zuerst charakterisiert und, in einem weiteren Schritt durch den Einsatz des Gitterschnitttests, die Haftungseigenschaften des UV-Farbauftrags evaluiert. Von den untersuchten UV-Vorbehandlungen ist der Einsatz eines hochenergetischen Xe-Excimer-Strahlers mit einem Wellenlängenpeak bei 172 nm das wirkungsvollste UV-basierte Vorbehandlungsverfahren zur Modifikation der Oberflächeneigenschaften. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass das derzeit in Entwicklung befindliche chromfreie Weißblech in seiner Benetzung derart günstige Eigenschaften aufweist, dass auf eine Vorbehandlung gänzlich verzichtet werden könnte. Die Ergebnisse münden abschließend in einer abgeleiteten konzeptionellen Folgerung im Hinblick auf eine neuartige Linienkonfiguration zum Lackieren und Bedrucken von Weißblechen.

Abstract

In the constantly growing market for packaging, there is indirect competition between the market segments classified according to materials, in which there is a tendency towards expansion into packaging forms of other material groups. Metal as a printing substrate is a material that has a number of special properties compared to plastic, glass and cardboard that can be used to increase competitiveness. In order to achieve this goal, this work is dedicated to the scientific processing of metal packaging and metal decorating respectively. In addition to the classification of the enormous variety of products, the specific requirements for metal packaging and the printing press and line configurations used, the materials used - tinplate, coatings and inks - as well as process-specific features are also taken into account. The experimental focus of this work is on the investigation of being able to print tinplate directly with UV inks, as this offers the potential for streamlining printing processes. In addition to accompanying color development and the analysis of the tinplate used, as well as the inclusion of partially standardized test methods for formability, the investigation of surface properties and their possible modification also play an important role. Due to the difficulties in achieving sufficient adhesion of UV-based ink systems to tinplate, the effect of pretreating tinplate with UV rays from different wave spectra is being investigated in detail experimentally for the first time. By measuring the contact angles and determining surface energies, the wetting modifications of the tinplate caused by UV radiation are first characterized and, in a further step, the adhesion properties of the UV ink application are evaluated by using the cross-cut test. Of the UV pretreatments examined, the use of a high-energy Xe excimer emitter with a wavelength peak at 172 nm is the most effective UV-based pretreatment process for modifying the surface properties. Moreover, the results show that the chromium-free tinplate currently under development has such favorable wetting properties that pre-treatment could be dispensed. The results finally lead to a derived conceptual conclusion with regard to a new line configuration for coating and printing tinplate.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam für die Förderung, die durchgehende Unterstützung sowie das in mich gesetzte Vertrauen, ein derartiges Projekt durchzuführen. Des Weiteren danke ich Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche für die sehr gute Zusammenarbeit und die Übernahme des Koreferats. Weiterhin danke ich Prof. Dr. rer. nat. Karl Schaschek von der Hochschule der Medien, Stuttgart, für die hilfreichen Diskussionen. Diese Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Fa. Koenig & Bauer-MetalPrint GmbH, Stuttgart. Ein besonderer Dank gilt Bernhard Mokler, der mir auch neben dem zeitweise sehr turbulenten Tagesgeschäft die Möglichkeit gegeben hat, meinem Promotionswunsch verfolgen zu können. Ebenfalls danke ich Ralf Gumbel für die durchgehende Unterstützung, die stets kritischen Diskussionen und vor allem bei der Hilfestellung zur Auswahl dieses Bearbeitungsthemas. Ferner danke ich meinen Kollegen Rainer Simon und Benjamin Törkö für die fortwährende Unterstützung während des Bearbeitungszeitraumes. Auch sei an dieser Stelle Klaus Kirsch gedankt, der dieses Vorhaben stets unterstützte. Ein besonderer Dank gilt Andreas Beutinger und seinem Team, Thomas Mai, Dr. Heinz Schweiger und Eddi Scheunemann von der Fa. ZellerGmelin, Eislingen, für die gemeinsame Arbeit im Labor. Ein weiterer Dank gilt Tatjana Legchilo und ihrem Team von TK Rasselstein, Andernach, für die durchgehende Versorgung mit Weißblech sowie für die Möglichkeit der Durchführung der Umformungsversuche in ihrem Labor. Auch Prof. Dr. Rainer Mehnert und Dr. Rolf Schubert der Fa. IOT Innovative Oberflächentechnologien GmbH, Leipzig, gilt ein besonderer Dank für die Laborversuche mit dem Excimer-Strahler. Ein dankender Gruß sei außerdem an das gesamte Team des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren für die wunderbaren Kolloquien und interessanten Diskussionen gerichtet. Bedanken möchte ich mich auch bei Amanda Hilse für die aufwendigen Korrekturen sowie für die langjährige und unerschütterliche Freundschaft. Ein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, welche mich immer in jeder Lebenslage unterstützt haben und mir bei der Verwirklichung meiner Ziele stets zur Seite standen. Mein größter Dank gilt meiner liebevollen Frau Franziska für die fortwährende Unterstützung sowie für das Verständnis auf den Verzicht ihres Ehemanns während der Erstellung dieser Arbeit.

Berlin, Stuttgart, Darmstadt, den 08. Juni, 2019

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen.....	3
2.1 Metallverpackungen.....	4
2.1.1 Klassifikation von Metallverpackungen	4
2.1.2 Herstellung dreiteiliger Metallverpackungen.....	8
2.1.3 Aufbau einer Metallverpackung im 3-Teil.....	11
2.1.4 Anforderungen	14
2.2 Materialien	21
2.2.1 Weißblech	21
2.2.2 Lacke	27
2.2.3 Druckfarben	30
2.3 Trocknungs- und Härtingsverfahren	31
2.3.1 Thermische Trocknung	31
2.3.2 UV-Strahlenhärtung	34
2.4 Oberflächeneigenschaften.....	38
2.4.1 Oberflächenenergie und Benetzung	38
2.4.2 Verfahren zur Oberflächenbehandlung	41
2.5 Produktionslinien und Linienkonfigurationen	42
2.5.1 Lackierlinien	42
2.5.2 Druckmaschinen und Drucklinien	44
2.5.3 Linienkonfigurationen.....	46
2.5.4 (Patent-)Ansätze für Produktionslinien.....	48
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	51
4. Analyse- und Charakterisierungsmethoden.....	53
4.1 Analysemethoden zur Charakterisierung der Benetzung und Haftung....	53
4.1.1 Kontaktwinkelmessung	53
4.1.2 Gitterschnitttest	55
4.1.3 Methode zur Prüfung der Haftung mit Tesa 4124	56
4.1.4 Rasterelektronenmikroskopie (REM)	56
4.2 XPS-Analyse: Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie	57
4.3 Methoden zur Charakterisierung der Umformbarkeit.....	59
4.3.1 Schlagfalttest	60
4.3.2 Ritzhärte-Prüfung.....	61

4.3.3	Beta-Napf-Prüfung (β 2-Napf) ohne und mit Sterilisation	61
4.3.4	Tiefungsversuch mit Sterilisation und Tesa-Test.....	63
4.4	Versuchsplanung und -durchführung.....	64
4.4.1	Versuchsübersicht	65
4.4.2	Materialien und Vorbehandlungsverfahren.....	66
5.	Ergebnisse	71
5.1	Machbarkeitsuntersuchung	71
5.1.1	Materialien und Auftrag	72
5.1.2	Benetzungseigenschaften	75
5.1.3	Tesa-Test und UV-Vorbehandlung	76
5.2	Farbentwicklung.....	77
5.2.1	Materialien und Auftrag	77
5.2.2	Gitterschnitttest	79
5.3	Umformbarkeit.....	81
5.3.1	Materialien und Auftrag	81
5.3.2	Schlagfalttest	83
5.3.3	Ritzhärte-Prüfung	85
5.3.4	Beta-Napf-Prüfung (β 2-Napf).....	86
5.3.5	Tiefungsversuch	88
5.3.6	Ergebnisse der Umformungsuntersuchungen	89
5.4	Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren	92
5.4.1	Materialien und Auftrag	92
5.4.2	Eingesetzte Vorbehandlungsverfahren.....	93
5.4.3	Benetzungseigenschaften	95
5.4.4	Benetzungsveränderungen - Kontaktwinkel	96
5.4.5	Benetzungsveränderungen - Oberflächenenergie	100
5.4.6	Gitterschnitttest	104
5.4.7	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen	106
5.5	Excimer-Vorbehandlung.....	110
5.5.1	Materialien und Auftrag	110
5.5.2	Eingesetzte Vorbehandlungsverfahren: Excimer-Strahler	111
5.5.3	Benetzungseigenschaften	112
5.5.4	Benetzungsveränderungen	112
5.5.5	Gitterschnitttest	119
5.5.6	XPS-Analyse	121
6.	Diskussion	123
6.1	Einfluss der eingesetzten Materialien	124

6.1.1	Weißblech	124
6.1.2	Farbe.....	127
6.2	Prüfmethoden zur Umformung	127
6.2.1	Diskussion zur Umformbarkeit.....	127
6.2.2	Prozesse und Produkte	129
6.3	Wirkmechanismen einer UV-Vorbehandlung	134
6.3.1	Photochemische Reaktionen durch UV-Strahlung	134
6.3.2	Veränderung des Kontaktwinkels mittels UV-Strahlung.....	138
7.	Konzeptionelle Folgerungen	140
7.1	Linienkonfiguration	141
7.1.1	UV-Linienkonfiguration	141
7.1.2	Randbedingungen zum Auftrag der weißen Grundierschicht....	144
7.2	Varianten der Produktionslinien	146
7.2.1	Produktionslinie mit planen Tafeltransport.....	146
7.2.2	Produktionslinie mit Greiferschluss.....	149
7.3	Farbwerkskonfiguration des Grundierwerks.....	151
7.3.1	Druckwerk.....	152
7.3.2	Farbwerk	154
7.4	Einsatzmöglichkeiten.....	156
8.	Zusammenfassung und Ausblick.....	158
9.	Literaturverzeichnis	161
A.	Anhang	176
A.1	Probenbleche der Vorversuche: Farbentwicklung	176
A.2	Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen	179
A.3	Ergebnisse der XPS-Analyse	204

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
β	-	Tiefziehverhältnis
θ	[°]	Kontaktwinkel
λ	[nm]	Wellenlänge
σ	[mN/m]	Oberflächenspannung
σ_L	[mN/m]	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
σ_{LS}	[mN/m]	Grenzflächenspannung
σ_S	[mN/m]	Oberflächenenergie des Festkörpers
σ_i^d	[mN/m]	Disperser Anteil der Oberflächenspannung
σ_i^p	[mN/m]	Polarer Anteil der Oberflächenspannung

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	[m ²]	Fläche
c	[m/s]	Vakuumlichtgeschwindigkeit
D	[mm]	Rondendurchmesser
d_n	[mm]	Durchmesser des Stempelwerkzeuges mit Zuganzahl
e	-	Elektronenstoß
E	[eV]	Elektronenenergie
E_B	[eV]	Bindungsenergie
E_{kin}	[eV]	Kinetische Energie
F	[N]	Kraft
h	[Js]	Plancksches Wirkungsquantum
h_{max}	[mm]	Maximale Höhe des zylindrisch tiefgezogenen Napfes
h_{min}	[mm]	Minimale Höhe des zylindrisch tiefgezogenen Napfes
$I\cdot$	-	Initiatorradikal
I_2	-	Initiator

<i>m</i>	[u]	Atomare Masseneinheit
<i>M</i>	-	Monomer
N_A	[mol ⁻¹]	Avogadro-Konstante
<i>P</i> ·	-	Polymerradikal
<i>t</i>	[Sek.]	Zeit
<i>W</i>	[J]	Arbeit
<i>Z</i>	-	Zipfligkeit

Abkürzungen

Abs.	Absatz
AD	Atmosphärendruck
Al	Aluminium
Ar	Argon
ATBC	Acetyltributylcitrat
Br	Brom
BSO	Butyl Stearate Öl
Bspw.	Beispielsweise
C	Kohlenstoff
Ca.	circa
CFPA	Chromium Free Passivation Alternative
Cl	Chlor
CMYK	Cyan, Magenta, Yellow, Key
Cr	Chrom
CT-Dosen	Chemisch-technische Dosen
CuSO ₄	Kupfersulfat
D ₂	Deuterium
D. h.	Das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung

DOS	Dioctylsebacat
DRD	Draw and redraw
DWI	Draw and wall-ironed
ECCS	Electrolytic chromium coated steel
EN	Europäische Norm
EP	Europäisches Patentamt
ETP	Electrolytic tin plate
EU	Europäische Union
E-UV	Extremes-UV
Expon.	Exponentiell
Fa.	Firma
FDA	Food and Drug Administration
G	Gramm
Ga	Gallium
Ggf.	Gegebenenfalls
Ggü.	Gegenüber
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
H	Wasserstoff
Hg	Quecksilber
IBC	Intermediate Bulk Container
I. d. R.	In der Regel
In	Indium
IPA	Isopropylalkohol
ISO	International Organization for Standardization
J	Joule
k.A.	Keine Angabe
Kr	Krypton
KrCl*	Krypton-Clor-Excimer
KrW - AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

L	Liter
LED	Light Emitting Diodes
Mech.	Mechanische
Min.	Minute/ Minuten
Mrd.	Milliarde
MSA	Mobile Surface Analyzer
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
Nm	Nanometer
Na	Natrium
O	Sauerstoffatom
O ₃	Ozon
OE	Oberflächenenergie
OWRK	Owens, Wendt, Rabel und Kaeble
PET	Polyethylenterephthalat
PVC	Polyvinylchlorid
R	Organischer Rest
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REM	Rasterelektronenmikroskopie
Sek.	Sekunde/ Sekunden
Sn	Zinn
Std.	Stunde/ Stunden
TFS	Tin free steel
Ti	Titanium
TK	ThyssenKrupp
U. A.	Und Anderes
UV	Ultraviolett
VE	Voll entsalzt
Vgl.	Vergleiche

Versch.	verschiedene
V-UV	Vakuum-UV
Xe	Xenon
Xe ^{2*}	Xenon-Excimer
XeBr*	Xenon-Brom-Excimer
XeCl*	Xenon-Chlor-Excimer
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
Z. B.	Zum Beispiel
Zr	Zirkonium

1. Einleitung

Im Jahr 1795 lobte Napoleon Bonaparte einen Preis von 12.000 Goldfranken für denjenigen aus, der ihm eine Methode für die Haltbarkeit und Transportierbarkeit von Lebensmitteln lieferte [Ashton 2015, Demuth 2005]. Der Gewinner dieses Preises war der Pariser Konditor und Zuckerbäcker François Nicolas Appert, welcher heute als Vater der Lebensmittelkonservierung gilt. Nur ein Jahr später, am 25. August 1810, erhielt der Engländer Peter Durand ein Patent auf die Konservendose, weshalb der 25. August auch als „Tag der Konservendose“ gilt [CanCentral 2018, Demuth 2005]. Napoleon scheiterte dennoch vor Moskau unter anderem daran, dass er die Lebensmittelversorgung seiner Truppen nicht organisiert bekam, was aber nicht daran lag, dass das erste Patent eines Dosenöffners erst ein halbes Jahrhundert später von Ezra J. Warner im Jahre 1858 eingereicht wurde [Demuth 2005, Warner 1858].

Heute ist die Konservendose nur eine von vielen Verpackungsformen aus Metall, welche neben der Konservierung und Aufbewahrung von Nahrungsmitteln auch Füllgüter industriellen Nutzens speichern kann. Die Diversität, sowohl in der Form als auch des potenziellen Füllgutes, ist eine der größten Vorteile von Metallverpackungen gegenüber Verpackungen anderer Werkstoffe. Zu Promotionszwecken lassen sich Metallverpackungen, ebenso wie Verpackungen aus anderen Werkstoffen, mit mehrfarbigen Dekoren bedrucken. Zudem ist es im Falle von Weißblech grundsätzlich erforderlich, das gesamte Substrat beidseitig mit einem vor Korrosion schützenden Lack zu versehen. Im industriellen Maßstab kommen dafür spezielle Druck- und Lackierlinien zum Einsatz. Aufgrund der Tatsache, dass Weißblech gegenüber Kunststoffen, Glas oder Kartonagen ein sehr kostenintensiver Werkstoff ist, widmet sich diese Arbeit den drucktechnischen Prozessen im Blechdruck. Heute werden für die mit dem Weißblech in Kontakt stehenden Lackanwendungen ausschließlich auf Lösemitteln basierende Lacke verwendet, welche über eigens dafür vorgesehene Lackierlinien verdruckt werden. Dadurch bedarf es mehrerer Produktionslinien, um die für das Endprodukt notwendigen Lack- und Farbaufträge vollständig beschichten zu können. In diesem Zusammenhang ist eine UV-basierte Grundierung als Alternative eine Anwendung mit sehr großem Potenzial [Dowbenko 1983], wodurch Prozesse wirtschaftlich gestrafft werden könnten. Die Untersuchung von Oberflächeneigenschaften respektive deren Veränderungen stellt einen Schwerpunkt dieser Arbeit dar, um damit Rückschlüsse auf

Haftungseigenschaften UV-basierender Farbsysteme auf Weißblechen gewinnen zu können. In Kapitel 2 werden Metallverpackungen im Allgemeinen klassifiziert. Im Speziellen liegt der Schwerpunkt bei dreiteiligen Metallverpackungen. Berücksichtigt werden Herstellungsverfahren, Aufbau und Anforderungen. Ferner werden die zur Anwendung kommenden Druck- und Lackierlinien beschrieben, mit welchen die drucktechnischen Prozesse realisiert werden. Auch die beteiligten Materialien des Blechdrucks, wie das Weißblech selbst sowie die heute üblichen Lacke und Farben, werden als ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ausführlich dargestellt. Zudem spielen auch die Trocknungs- und Härtungsverfahren eine gewichtige Rolle. Der Auftrag von Farbe oder Lack ist erst dann qualitativ, wenn diese auch auf dem Weißblech in ausreichender Form haften bleibt. Aus diesem Grund sind die Oberflächeneigenschaften sowie deren Modifikation von signifikanter Bedeutung. In Kapitel 3 erfolgt die Definition der Zielsetzung dieser Arbeit, nach der der experimentelle Teil der Arbeit ausgerichtet wird. In Kapitel 4 werden die für die durchgeführten Versuche verwendeten Analyse- und Charakterisierungsmethoden vorgestellt, welche sich in die Methoden zur Evaluierung der Benetzung und Haftung, der Umformbarkeit sowie weiteren Charakterisierungsmethoden gliedern. Der experimentelle Teil dieser Arbeit ist in Kapitel 5 zusammengefasst. In fünf Abschnitten werden dabei die Möglichkeiten, ein UV-härtendes Farbsystem direkt auf Weißblech haftungssicher beschichten zu können, untersucht. Beginnend mit einer Machbarkeitsstudie und weiterführend mit Versuchen zur Farbentwicklung finden zudem Umformungsversuche statt, bei denen die Haftung der UV-Farbe auf dem Weißblech unter mechanischer Beanspruchung geprüft wird. Des Weiteren befasst sich der experimentelle Teil mit der Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren von Weißblech, wobei der Schwerpunkt auf die Vorbehandlung mittels UV-Strahlung gelegt wird. Hervorzuheben ist, dass im Laufe der Untersuchungen chromfrei passiviertes Weißblech in die Versuche einbezogen wird, welches eine neuartige Weißblechvariante für Metallverpackungen darstellt. Kapitel 6 gliedert sich in drei wesentliche Abschnitte, in welchen die Ergebnissgewinne diskutiert werden. Zum einen sind das die Auffälligkeiten bei den verwendeten Materialien, zum anderen die Ergebnisse der Umformungsversuche und die Darlegung der photochemischen Wirkmechanismen einer UV-Vorbehandlung. Im abschließenden Kapitel 7 werden aus den Erkenntnissen der Versuche konzeptionelle Folgerungen im Hinblick auf neue Druck- und Lackierlinien gezogen, welche einer wirtschaftlicheren Herstellung von Metallverpackungen Rechnung tragen könnten.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel sind die wesentlichen interdisziplinären Themenbereiche rund um den Blechdruck zusammengetragen. Angefangen mit allgemeinen Themen zu (dreiteiligen) Metallverpackungen in Abschnitt 2.1, wie deren Klassifikation und dem Aufbau einer typischen Metallverpackung, finden zudem Differenzierungen zu Teilsegmenten wie z. B. der Getränkedose ebenso Berücksichtigung, wie die Betrachtung des Herstellungsprozesses mit allen wesentlichen Besonderheiten. Auch wird auf die allgemeinen Anforderungen des Blechdrucks Bezug genommen. Dabei wird von einem allgemeinen Blickwinkel auf Metallverpackungen ausgegangen. Daraus abgeleitet werden die Anforderungen der Produktionsumgebung, der Qualitätssicherung sowie der Weiterverarbeitung veranschaulicht. In Abschnitt 2.2 werden zum einen die zum Einsatz kommenden Weißbleche näher betrachtet. Auch hier werden die Herstellungsprozesse dargestellt und Unterschiede aufgezeigt. Zum anderen wird vordergründig auch auf Lacke, deren Aufbau und Einsatzgebiete eingegangen. Das Thema Trocknungs- und Härtingsverfahren sowie UV-Farbsysteme wird hingegen losgelöst in einem separaten Abschnitt 2.3 behandelt. Zudem werden in Abschnitt 2.4 die Zusammenhänge von Oberflächeneigenschaften und Möglichkeiten für deren Veränderung erläutert, welche einer verbesserten Haftung zwischen Farbe und Weißblech Rechnung tragen sollen. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.5 ein Überblick zu den Druck- und Lackiermaschinen, wie diese in der heutigen Praxis Anwendung finden. Dies erlaubt einen tieferen Einblick zu den typischen Linienkonfigurationen. Darüber hinaus wird auch auf Möglichkeiten zur Straffung der Produktionsprozesse innerhalb der Linienkonfiguration eingegangen, um so den Stand der Technik aufzuzeigen. In jedem der behandelten Abschnitte finden sich jeweils Aspekte, die für die Zielsetzung dieser Arbeit notwendig sind, nicht aber den allgemeinen Grundlagen des Blechdrucks zuzuordnen sind. Dies ist insofern relevant, um die in Kapitel 4 und 5 behandelten Versuche und Zusammenhänge diskutieren zu können.

2.1 Metallverpackungen

2.1.1 Klassifikation von Metallverpackungen

Der Verpackungsmarkt untergliedert sich in die einzelnen Werkstoffe Karton/ Papier/ Pappe, Kunststoffe, Glas und Metall. Letzterer Werkstoff macht vom Gesamtmarktumsatz von 670 Mrd. \$ im Jahr 2010 einen Marktanteil von ca. 15 % aus [Kaßmann 2014]. Dabei wurden die metallischen Werkstoffe Stahl und Aluminium zusammengefasst betrachtet. Metallverpackungen gliedern sich in zwei Obergruppen: Industrieverpackungen (chemisch/ technisch) und Nahrungsmittelverpackungen [Kittel 2008, Röhrig 2010]. Diesen beiden Gruppen können alle handelsüblichen Metallverpackungen zugeordnet werden. Eine weiterführende Klassifizierung ergibt sich bei Berücksichtigung des Füllvolumens wie in Abbildung 2-1 durchgeführt. Massengutbehälter und Tanks sind nach der hier gezeigten Darstellung lediglich der Vollständigkeit halber aufgeführt und von Metallverpackungen abzugrenzen, da Massengutbehälter den Großpackmitteln zuzuordnen sind und Tanks sowohl in Form von Gebäuden als auch auf Transportfahrzeugen montiert vorkommen können. Das maximale Füllvolumen einer Metallverpackung beträgt daher 250 l.

Füllvolumen	Nahrungsmittelverpackungen		Industrieverpackungen		
-	Kronkorken	Verschlüsse			
< 1 l	Food-Dosen	Getränkedosen	Tuben/ Hülsen	Dosen für chemisch/ technische Verpackungen (CT-Dosen)	Aerosol
1 l – 5 l	Nahrungs- mittel (Konserven- dose)	Getränkefässer	Flaschen		Hobbocks
5 l – 10 l			Kanister		
10 l – 50 l					
50 l – 100 l	Fässer				
100 l – 250 l	Getränkebehälter		Fässer		
250 l – 3.000 l	Massengutbehälter (IBC – Intermediate Bulk Container)				
> 1.000 l	Tanks				

Abbildung 2-1: Klassifikation von Metallverpackungen nach den Verpackungsarten für Nahrungsmittel- und Industrieverpackungen sowie dem Füllvolumen [eigene Darstellung]

Unabhängig vom Verwendungszweck des Füllgutes können Metallverpackungen außerdem nach dem Aufbau der metallischen Elemente in drei Arten segmentiert werden:

- 3-Teil: bestehend aus Boden, Mantel und Deckel
- 2-Teil: bestehend aus Mantel mit Boden und Deckel
- 1-Teil: bestehend aus Mantel mit Boden; Deckel i. d. R. aus Kunststoff

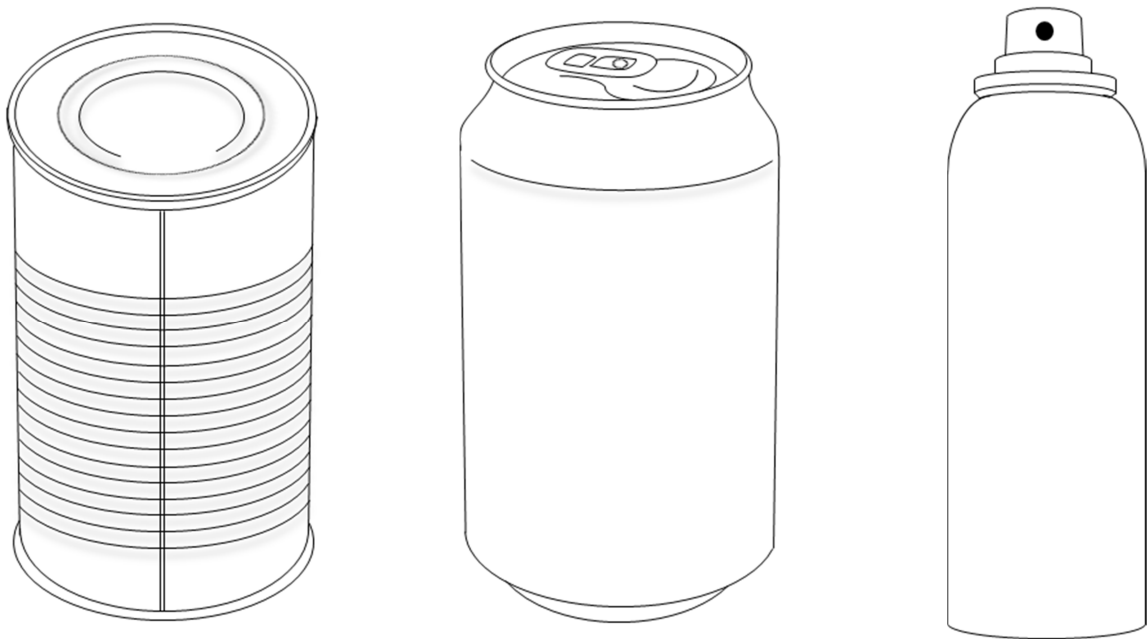


Abbildung 2-2: Konservendose (3-Teil), Getränkedose (2-Teil) und Aerosoldose (1-Teil) nach [KBA 2017e]

3-Teil

Die größte Anzahl an Produktgruppen liegt im 3-Teil. Neben Verschlüssen, Kronkorken und weiteren Sonderformen existiert hier eine weitere Unterklasse, die sogenannte „General Line“. Unter diese fallen die typische Konservendose, CT-Dosen (chemisch-technische Dosen) sowie Kanister und Hobbocks. Als Werkstoffe kommen im 3-Teil sowohl Aluminium als auch Weißblech zum Einsatz. Diese liegen entweder als Tafel- oder Scrollware (schmalbahnseitiger Beschnitt der Tafeln bei Verarbeitung kreisförmiger Nutzen) vor. Das kennzeichnende Formgebungsverfahren im 3-Teil ist das Schweißverfahren. Das wesentliche Druckverfahren für Produkte im 3-Teil ist der Offsetdruck.

2-Teil

Unter dem Begriff 2-Teil wird in erster Linie das Produkt Getränkedose verstanden, welches aus dem Dosenkörper (Mantel und Boden) und dem Deckel besteht. Die verwendeten Werkstoffe sind Weißblech (Weltmarktanteil: 8 %) und vornehmlich Aluminium (Weltmarktanteil: 92 %) [KBA 2017d]. Die Herstellung von Getränkedosen ist als verkettete Linienproduktion aufgebaut, an dessen Beginn das Rohmaterial in Form von aufgerollter Bandware (Coils) einem ersten Bearbeitungsschritt, der Napfstanzung zugeführt wird. Die Vereinzelung in Näpfe sowie die Umformung zu Hohlkörpern wird durch Abstrecken realisiert. Abstrecken wird auch als DWI-Verfahren (**d**rawn and **w**all-**i**roned) bezeichnet. Dabei wird sowohl die Materialform als auch die Materialdicke unter Druck auf die gewünschten Maße umgeformt [Coles 2003].

Ein weiteres Verfahren zur Formgebung im 2-Teil ist das sogenannte DRD-Verfahren (**d**raw-**r**ed**r**aw), bei dem die Materialform verändert wird, die Materialdicke aber unverändert bleibt [Coles 2003]. Das DRD-Verfahren wird auch als Tiefziehen bezeichnet.

1-Teil

Die wesentlichen Produkte im 1-Teil sind Tuben/ Hülisen, Flaschen und Aerosoldosen. Als Werkstoff wird ausschließlich Aluminium verarbeitet. Dieser liegt in Form von Butzen (Aluminiumtaler) vor, welche durch Fließpressen in die gewünschte Form durch Druck umgeformt werden [Turner 1998].

Das hauptsächliche Druckverfahren für 2-Teil Getränkedosen und Produkte im 1-Teil ist der indirekte Hochdruck, das Lettersetdruckverfahren.

Identifikationsmerkmale zur visuellen Unterscheidung von 3-Teil, 2-Teil und 1-Teil Produkten sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1: Visuelle Identifikationsmerkmale von Metallverpackungen der Segmente 3-Teil, 2-Teil und 1-Teil [KBA 2016a]

3-Teil (Konservendose)	2-Teil (Getränkedose)	1-Teil (Aerosoldose)
<ul style="list-style-type: none"> - Schweißnaht am Mantel - Ggf. Mantelrillen 	<ul style="list-style-type: none"> - Blanker Boden - Keine Schweißnaht - Prägung am Boden durch Abstreckwerkzeug 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Schweißnaht - Radiale Ziehstreifen am Boden

In Abbildung 2-3 sind die einzelnen Produktgruppen in die Teilsegmente 3-Teil, 2-Teil und 1-Teil geordnet. Des Weiteren sind Werkstoffe, Formgebungsverfahren und die zur Dekoration verwendete Drucktechnik den jeweiligen Produkten zugeordnet. Die Zuordnung stellt jeweils die Hauptanwendungen dar. Sonderfälle werden nicht berücksichtigt.

Segmente		3-Teil	2-Teil	1-Teil
Produktgruppen in der Marktverteilung	Kronkorken	3-Teil		
	Verschlüsse		2-Teil	1-Teil
	Food-Dosen		2-Teil	
	Getränkedosen			
	Tuben/ Hülsen			
	Flaschen		2-Teil	1-Teil
	Aerosol	3-Teil		
	CT-Dosen			
	Konservendose			
	Hobbocks			
	Kanister			
	Fässer		3-Teil	
General Line				
Werkstoffe	Weißblech	Weißblech	Weißblech	
	Aluminium	Aluminium	Aluminium	
Formgebungsverfahren	Rohmaterialform	Tafel (Scroll)	Band	Butzen
	Formverfahren	Schweißen	DRD	DWI
Drucktechnologie	Materialform	Tafel- & Scrollware/ flach	Hohlkörper/ rund	
	Druckverfahren	Offsetdruck	Siebdruck	Offsetdruck
	Geschwindigkeit	200 [m/Min.]	7 [m/Min.]	200 [m/Min.]

Abbildung 2-3: Klassifikation von Metallverpackungen hinsichtlich ihres Aufbaus mit Zuordnung der Marktsegmente nach Produktgruppen, Werkstoffen, Formgebungsverfahren und Drucktechnologie nach [Mokler 2014]

Die Abbildung 2-1 und Abbildung 2-3 zeigen, wie facettenreich der Markt für Metallverpackungen ist. Der Fokus wird sich in der näheren Betrachtung auf das Segment 3-Teil beschränken, da hier der Themenschwerpunkt liegt.

2.1.2 Herstellung dreiteiliger Metallverpackungen

Das Rohmaterial wird in Form von Band-, Tafel- oder Scrollware in die Blechdruckerei geliefert. Häufig werden auch bereits vorlackierte Bleche von den Druckereien beim Hersteller als Lohnauftrag bestellt.

Bleche mit Scroll-Schnitt finden Einsatz, um beim Stanzen der Ronden (Rundnutzen für Boden und Deckel) die Materialausnutzung zu erhöhen [Unico 2009]. Je nach Auftrag kann auch eine nachträgliche Konfektionierung auf ein bestimmtes Format erfolgen.

Das den auftragsbezogenen Anforderungen entsprechend blanke Weißblech wird auf Lackierlinien beidseitig lackiert (Innen- und Außenlack) und mit dem jeweiligen Druckbild bedruckt. Anschließend, wenn es das Endprodukt erfordert, wird es wiederum lackiert (Schutzlack), um das Druckbild vor mechanischen Beanspruchungen zu schützen. Eine Besonderheit bei der Lackierung der Tafeln sind die zu berücksichtigenden Lackaussparungen zwischen den Nutzen. Diese sind notwendig, um einen einwandfreien Schweißprozess bei der Zylinderformung zu gewährleisten. Die für die Schweißnaht vorgesehenen Bereiche müssen vom Lack frei gehalten werden, da der Lack eine isolierende Wirkung hat und zu Störstellen während des Schweißens führt. Druck- und Lackierlinien sowie die dafür verwendeten Maschinen werden im Abschnitt 2.5 näher beschrieben.

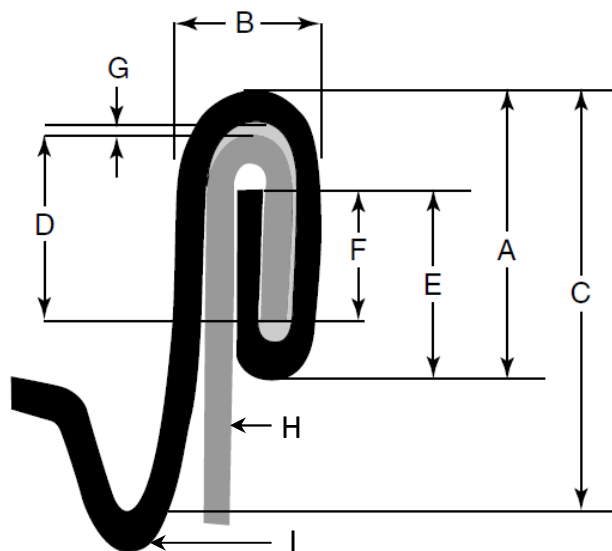
Nachdem die Tafelware mit der Innen-, Außen- und Schutzlackierung sowie mit dem Druckbild bedruckt wurde, erfolgt der Beschnitt der Mantelnutzen in Einzelnutzen. Zum Zerteilen werden die Tafeln gestapelt im Anleger sogenannten Rollenschneidern zugeführt und dort vereinzelt. Die Beschnittreihenfolge kann sowohl Breitbahn-Schmalbahn als auch Schmalbahn-Breitbahn erfolgen. D. h., dass erst über eine Seite der beiden Richtungen Streifen geschnitten und anschließend die Nutzen aus den erhaltenen Streifen getrennt werden [Soudronic 2016].

Zum Formen des Dosenrumpfes wird das Magazin einer Schweißanlage mit den Mantelnutzen bestückt. Die Vereinzelung erfolgt von der Unterseite des Stapels mit der schmalen Seite in Transportrichtung. Nach einer kurzen Transportstrecke wird der Nutzen zu einem Zylinder gerollt und 90° seitlich weiter der Schweißstation zugeführt. Dabei handelt es sich um das Widerstandsrollennahtschweißen, bei dem ein Rollenpaar die Enden des Nutzen aufeinanderpresst und so den Schweißstrom auf der Nahtlinie konzentriert. Die Besonderheit bei diesem Schweißverfahren ist, dass während des Schweißvorganges eine Bewegung

zwischen den zu fügenden Elementen (hier die Nutzenenden) und den Rollenelektroden stattfindet [Geme 2016].

Noch innerhalb der Schweißanlage wird die Schweißnaht beidseitig mit Pulverlack besprüht und durch ein thermisches Trocknungssystem weitertransportiert. Die Nahtlackierung schützt die im Druck- und Lackierprozess ausgesparten Bereiche des Mantels vor möglicher Korrosionsbildung [Soudronic 2016].

Der Mantel wird zur Vorbereitung der Zusammenführung mit der Bodenrunde gebördelt. Häufig wird die Falzform „double seam“ verwendet (siehe Abbildung 2-4). Dabei wird zuerst das Ende des Mantels um ca. 90° nach außen umgeformt. Im Vergleich zum umgeformten Falz des Mantels besitzt die Bodenrunde einen größeren Durchmesser. Der Rondenüberstand wird um den nach außen stehenden Falz des Mantels gebogen, anschließend werden beide Elemente zusammen gepresst und an die Mantelfläche des Zylinders gedrückt. Unterstützend kann auch eine Fugenmasse verwendet werden, um vorhandene Lufteinschlüsse zu vermeiden und einen weiteren Dichtungsschutz zu erlangen.



- A – Länge des Falzes
- B – Dicke des Falzes
- C – Deckeltiefung
- D – Länge des Mantelfalzes
- E – Länge des Deckelfalzes
- F – Länge der Überlappung
- G – Zwischenspalt der Falzungen
- H – Mantel
- I – Bodenrunde

Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Falzform „double seam“ nach [Coles 2003]

Der Mantel wird, um die Stabilität zu erhöhen, in der Regel zusätzlich in Umfangsrichtung mit Rillen oder Wellen versehen (Sicken).

Vor der Abfüllung des Inhalts wird die Dose gereinigt. Abschließend erfolgen die Befüllung, die Verschließung der Dose mit der Deckelrunde sowie der für Lebensmittel notwendige Sterilisationsprozess. Der gesamte Produktionsablauf ist zur Veranschaulichung in der folgenden Abbildung 2-5 dargestellt.

Das folgende Diagramm zeigt den Herstellungsprozess von 3-Teil Konservendosen:

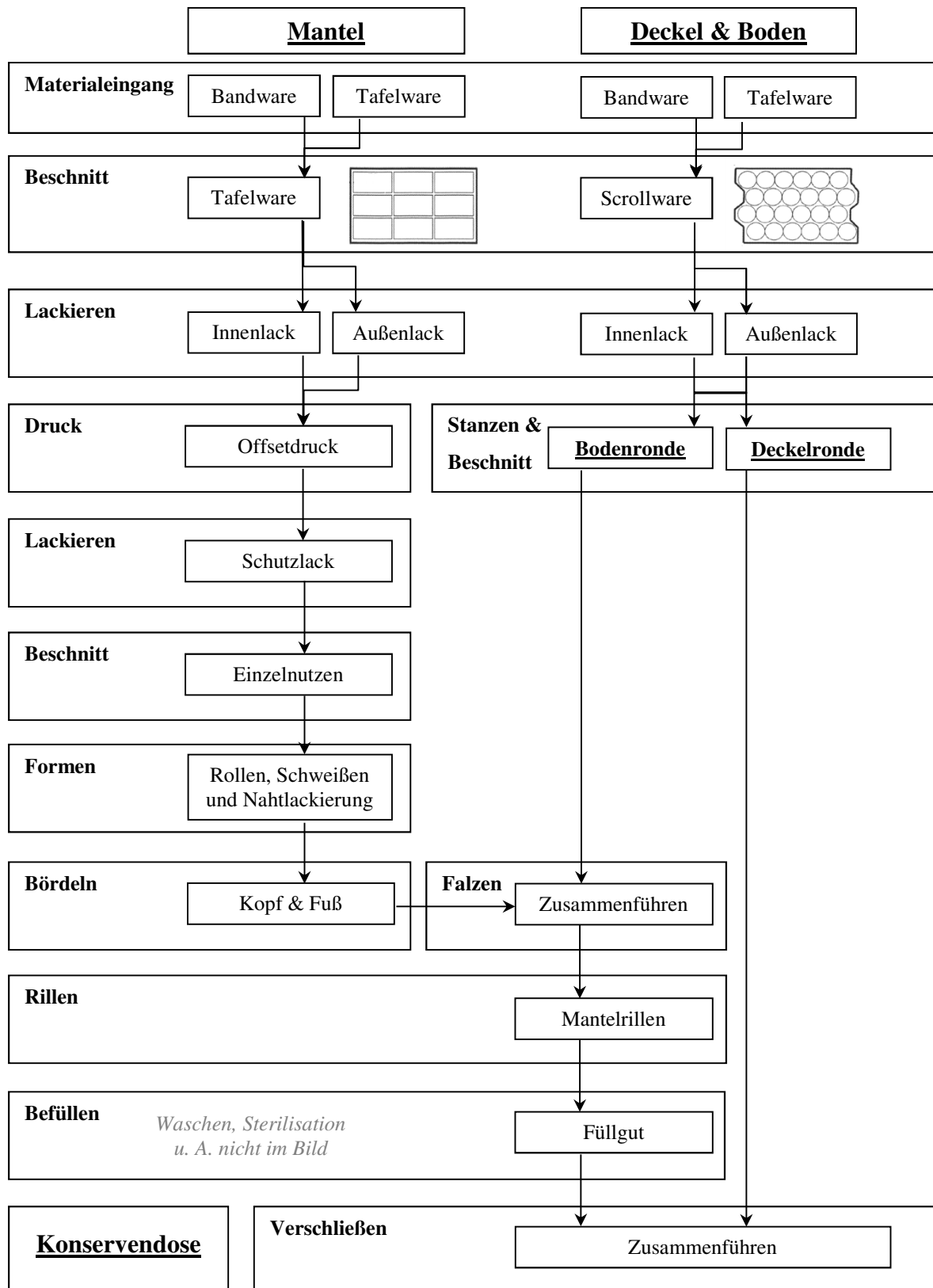


Abbildung 2-5: Flussdiagramm zur Herstellung von 3-Teil Konservendosen nach [Empac 2016]

2.1.3 Aufbau einer Metallverpackung im 3-Teil

Die drucktechnische Veredelung von Konservendosen im 3-Teil beinhaltet, wie schon angedeutet, eine Folge verschiedener Lackier- und Druckprozesse. Ersichtlich wird das anhand des Aufbaus einer typischen Metallverpackung im 3-Teil in Abbildung 2-6.

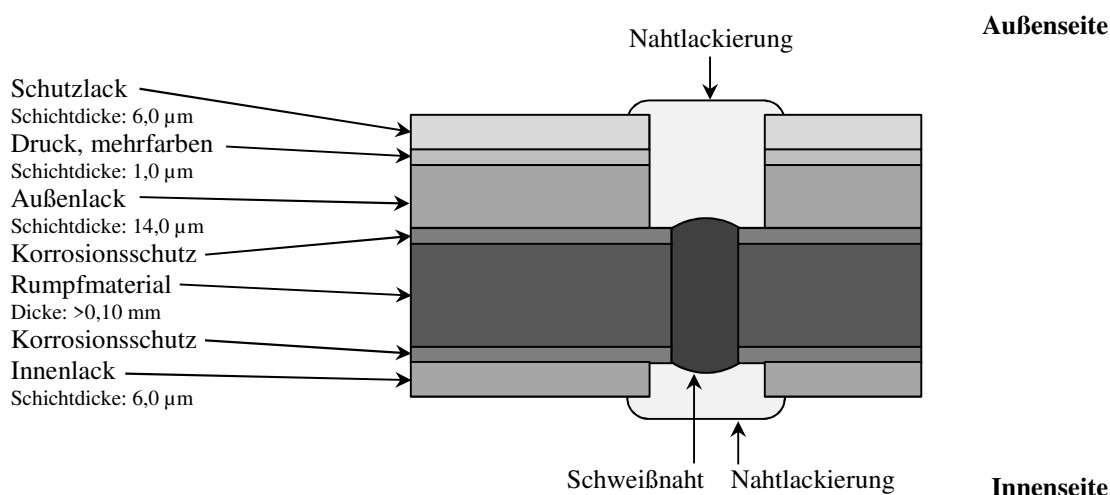


Abbildung 2-6: Querschnitt des Mantels an der Nahtstelle mit Aufbau der Druck- und Lackschichten auf einer Konservendose im 3-Teil nach [Mokler 2014]; Schichtdicken (indikativ) sind produktabhängig und können abweichen; trocken

Weißblech ist der wesentliche Werkstoff für Metallverpackungen im 3-Teil [Techner 1991, Brody 1997]. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auch auf diesem. Weißblech kann in drei Sorten unterschieden werden:

- ECCS/ TFS : **E**lektrolytic **C**hromium **C**oated **S**teel/ **T**in **F**ree **S**teel,
- ETP : **E**lectrolytic **T**in **P**late und
- CFPA : **C**hromium **F**ree **P**assivation **A**lternative.

Eine weiterführende Betrachtung von Weißblech folgt in Abschnitt 2.2.

Auf mehreren Lackierlinien oder mit nacheinander folgenden Liniendurchläufen wird das Weißblech mit den Lacken auf Innen- und Außenseite versehen, wobei grundsätzlich eine thermische Trocknung des Nassfilms durch Verdunsten des Lösemittels [Techner 1991] folgt. Anschließend erfolgt der im Offsetdruckverfahren aufgebraute Mehrfarbendruck mit dem entsprechenden Druckbild. Die dabei verwendeten Farbsysteme können thermisch trocknen oder aber mittels UV-Trocknung härten. Der abschließende Schutzlack wird in der Regel wieder in einer Lackierlinie aufgetragen. Es besteht aber auch hier die Möglichkeit, über eine in die Drucklinie integrierte Lackiermaschine einen UV-Schutzlack aufzutragen. In diesem

Fall sollte die Innenlackierung als letzter Veredelungsschritt folgen, da mit diesem ein weiterer thermischer Trocknerdurchlauf erfolgt, mit dem die im Schutzlack enthaltenen Photoinitiatoren restlos aktiviert bzw. ausgetrieben werden können [Nestlé 2014]. Bei näherer Betrachtung des Aufbaus können die fünf wesentlichen Druck- und Lackierschichten:

- Innenlack,
- Außenlack,
- Druck/ Mehrfarbendruck,
- Schutzlack und
- Nahtschutzlack (Pulverlack)

identifiziert werden. Diese Schichten variieren vornehmlich im Zweck, im Trocknungsverfahren sowie in Form des Tafeltransportes. Bei dem in Abbildung 2-6 dargestellten Aufbau handelt es sich aufgrund der im Querschnitt aufgeführten Schweißnaht um den Mantel einer dreiteiligen Konservendose. Der Aufbau gilt aber im Wesentlichen auch für Boden und Deckel. Die Abbildung 2-7 zeigt eine Klassifikation der vier wesentlichen Schichten (ohne Nahtschutzlack, da Bestandteil der Schweißanlage), wie diese in den heutigen Prozessabläufen angewandt werden. Anhand dessen können die Funktionen der Schichten vereinfacht beschrieben und auf erste Besonderheiten (z. B. Tafeltransport innerhalb der Druckmaschine) hingewiesen werden.

Schicht	Innenlack	Außenlack	Druck	Schutzlack
Auftrag	Lackieren	Lackieren	Drucken	Lackieren
Seite	Innen	Außen	Außen	Außen
Funktion	Schutz			Schutz
	Dekoration			
	Haftung			
Trocknung	Thermisch/ Lösemittel			
				UV-Härtung
Tafel-transport	Plan			
				Greiferschluss

Abbildung 2-7: Klassifikation der Schichten auf Metallverpackungen [eigene Darstellung]

Innen- und Außenlack schützen das Weißblech vornehmlich vor Korrosionserscheinungen. Die auf dem Weißblech aufliegende Konversionsschicht, im Folgenden als Passivierung bezeichnet, als temporär vorgesehener Korrosionsschutz, wird durch die Lackschichten als permanenter Korrosionsschutz in der Funktion ersetzt. Der Innenlack hat zusätzlich den Zweck, eine schützende Barriere zwischen dem Füllgut und dem Weißblech herzustellen. Im Falle eines unzureichenden Innenlackauftrags kann ein aggressives Füllgut das Weißblech nach kürzester Zeit angreifen und zur Perforation der Mantelfläche führen, in dessen Folge ein Auslaufen resultieren würde. Für die Art und Zusammensetzung des Innenlacks ist in erster Linie grundsätzlich das Füllgut maßgebend.

Der Außenlack trägt zusätzlich zur optischen Erscheinung des Druckbildes bei. Wird beispielsweise ein Weißlack verwendet, sorgt dieser für kontrastreichen Untergrund. Sowohl der Innen- als auch der Außenlack müssen so abgestimmt sein, dass diese auf dem Weißblech haften bleiben. Innenlacke sind hauptsächlich aus einer Kombination von Epoxy-/Phenolharzen aufgebaut. Bei Außenlacken werden Polyesterharze als Bindemittel verwendet [Kittel 2008]. Die Trocknung erfolgt nach heutigem Stand der Technik ausschließlich thermisch. Das typische Sortenverhältnis zwischen Innen- und Außenlack beträgt je nach Produktspektrum einer Druckerei ca. 8:1 [Massa 2016].

Als letzter Auftrag der Außenseite hat der Schutzlack die Funktion, das farbige Druckbild vor mechanischen Beschädigungen z. B. während des Transports oder während Weiterverarbeitungsprozessen zu schützen. Der Schutzlack sowie der Druck des Druckbildes können neben thermischer Trocknung auch in Form UV-härtender Systeme verdruckt werden.

Das Weißblech liegt gestapelt als Tafelware vor. Es existieren zwei Maschinenausführungen zum Transport der Tafeln. Zum einen plan über Vakuumbänder und Transportriemen, zum anderen rotativ mittels Greifertraversen. Eine nähergehende Betrachtung der maschinenbaulichen Besonderheiten von Druck- und Lackierlinien erfolgt in Abschnitt 2.5. Zuvor wird im folgenden Abschnitt 2.1.4 auf das Anforderungsspektrum von Metallverpackungen eingegangen.

2.1.4 Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen der industriellen Verpackungsherstellung sind vielfältig und müssen sowohl von Anwendern als auch Lieferanten stets berücksichtigt werden. Dies trifft natürlich auch auf Metallverpackungen zu. So beinhalten beispielsweise Gesetzesvorgaben der EU oder Richtlinien innerhalb der Nestlé Guidance produktionsspezifische Vorgaben, nach denen Prozesse gestaltet, Rohstoffe ausgewählt und Kennwerte eingehalten werden müssen. In diesem Zusammenhang ist die sogenannte REACH-Verordnung (**R**egistration, **E**valuation, **A**uthorisation and **R**estriction of **C**hemicals) hervorzuheben. REACH ist die Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe [Reach 2017]. Ein für die Metallverpackungsindustrie wesentlicher Stoff, welcher durch die REACH-Verordnung betroffen ist, ist das für die Oberflächenbehandlung von Weißblech verwendete Chrom(VI). Derzeit finden Anstrengungen hinsichtlich der Entwicklung von Alternativen zu Chrom(VI) statt. Mit dem sogenannten CFPA (**C**hromium **F**ree **P**assivation **A**lternative) soll bis 2021 der REACH-Verordnung Rechnung getragen und ein Ersatz für Chrom(VI) in Europa geschaffen werden. Auch die technologische Entwicklung im Bereich des Blechdrucks muss stets die Gegebenheiten der Anforderungen berücksichtigen. Im Bereich der technologischen Entwicklungen kommt dies doppelt zum Tragen. Einerseits werden Technologieentwicklungen durch Trends am Markt und veränderte Anforderungen ausgelöst. Andererseits gehen Anforderungen auch immer mit Restriktionen auf technologische Entwicklungen einher und bestimmen diese maßgeblich. Am Beispiel von Chrom(VI) wird dem Markt eine veränderte Anforderung auferlegt. Technologisch reagieren die Marktteilnehmer mit der Entwicklung von CFPA. Dieses wiederum muss ähnliche Anforderungen der bestehenden Werkstoffe erfüllen, um beispielsweise schweißfähig zu sein. In einem weiteren Beispiel soll auch der Digitaldruck genannt sein. Dem Trend hin zu immer kleiner werdenden Auflagenhöhen wird durch die Entwicklung von industriellen Inkjet-Druckmaschinen Rechnung getragen. Um auch eine Einsatzfähigkeit innerhalb der Produktionsumgebung zu gewährleisten, sind dabei zum einen die Anforderungen an die Druckqualität auf dem Weißblech zu erzielen. Zum anderen muss das verwendete Tintensystem die Anforderungen hinsichtlich der Nestlé Guidance Note für Verpackungsfarben erfüllen [Nestlé 2014].

Metallverpackungen stehen seit jeher mit anderen Verpackungswerkstoffen wie Karton, Glas oder Kunststoff im Wettbewerb. Eine wesentliche Kennzahl im Wettbewerb der Verpackungswerkstoffe ist die prozentuale, werkstoffliche Verwertungsquote. Es wird zwischen den verschiedenen Formen der Verwertung unterschieden [GVM 2016]:

- Werkstoffliche Verwertung von Materialien,
- Andere Formen der stofflichen Verwertung,
- Energetische Verwertung und
- Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen mit Energierückgewinnung.

Verpackungen aus Weißblech werden ausschließlich werkstofflich verwertet [GVM 2016]. Laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - § 4 Abs. 3 KrW - AbfG wird die (werk)stoffliche Verwertung wie folgt definiert:

„Die stoffliche Verwertung beinhaltet die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (sekundäre Rohstoffe) oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke mit Ausnahme der unmittelbaren Energierückgewinnung. Eine stoffliche Verwertung liegt vor, wenn nach einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise, [...] der Hauptzweck der Maßnahme in der Nutzung des Abfalls und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotentials liegt.“ [Krw AbfG 1994]

Die nachfolgende Tabelle 2-2 zeigt den Vergleich der werkstofflichen Verwertungsquoten für Verpackungswerkstoffe der Jahre 2008 bis 2014 für Deutschland.

Tabelle 2-2: Verwertungsquoten von Verpackungswerkstoffen von 2008 – 2014 [GVM 2015, GVM 2016]

Werkstoff	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Glas	82,2 %	82,5 %	86,0 %	88,4 %	84,7 %	88,7 %	89,0 %
Kunststoff	44,7 %	46,5 %	45,1 %	46,3 %	47,0 %	46,8 %	47,3 %
Papier/ Karton/ Pappe	87,7 %	90,3 %	90,1 %	88,0 %	87,6 %	88,0 %	87,1 %
Flüssigkeitskarton	67,8 %	63,2 %	72,5 %	70,5 %	71,0 %	77,5 %	75,8 %
Aluminium	80,0 %	85,1 %	89,3 %	89,1 %	87,7 %	89,3 %	88,1 %
Weißblechverpackungen	93,6 %	93,1 %	93,3 %	93,6 %	93,0 %	93,7 %	93,1 %
Sonstiger Stahl	92,3 %	91,2 %	93,2 %	92,7 %	92,6 %	93,7 %	93,0 %
Holz	27,6 %	29,4 %	26,3 %	29,0 %	29,1 %	25,2 %	26,5 %

Aus Tabelle 2-2 lässt sich entnehmen, dass Weißblech bezüglich der Verwertungsquoten eine Spitzenposition hält und damit einen äußerst nachhaltigen Werkstoff für Verpackungen darstellt. Neben Umweltaspekten existieren eine ganze Reihe an Anforderungen und Einflüssen, welche von den Marktteilnehmern berücksichtigt werden müssen. Die nachfolgende Abbildung 2-8 zeigt einen Überblick der Einflüsse hinsichtlich der branchenspezifischen Anforderungen in der Metallverpackungsindustrie.

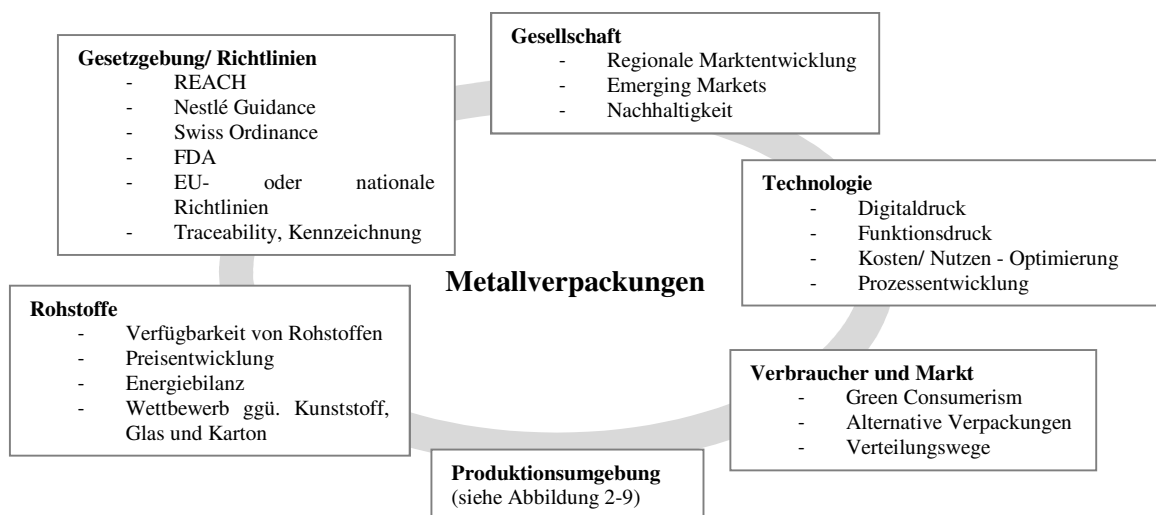


Abbildung 2-8: Branchenspezifische Anforderungen für Metallverpackungen nach [Mokler 2014]

Gesellschaftliche Anforderungen entstehen beispielsweise in Wachstumsmärkten wie China, wo bestimmte Produkte häufiger konsumiert werden und der Anspruch an eine ansprechende Verpackung sich kontinuierlich steigert. Auch Anforderungen von Gesetzgebern müssen berücksichtigt werden, wie z. B. die Einführung des Dosenpfandes (Einwegpfand) in Deutschland im Jahr 2003. Ein Beispiel für technologische Anforderungen stellt die Entwicklung des Digitaldrucks dar, wodurch kleinere Auflagenhöhen kostengünstig bedruckt werden können. Ob nun Umweltaspekte, Gesetzgebungen, Märkte oder technologische Entwicklungen, die Einflüsse und Anforderungen der Metallverpackungsindustrie sind vielseitig und facettenreich. Die Marktteilnehmer müssen für ein erfolgreiches Bestehen alle Aspekte berücksichtigen und auf zukünftige Veränderungen rechtzeitig reagieren.

Die in Abbildung 2-8 dargestellte Anforderung zur Produktionsumgebung stellt eine weiterführende Ebene dar. Wie in jeder verarbeitenden Industrie stellt auch die

Produktionsumgebung im Blechdruck eigene Anforderungen an die Anwender. Diese können in Herstellung, Drucktechnik, Materialien (Lacke/ Farben und Substrat) und Verpackung kategorisiert werden. Die nachfolgende Abbildung 2-9 stellt die Anforderungen der Produktionsumgebung für den Blechdruck im Überblick dar.

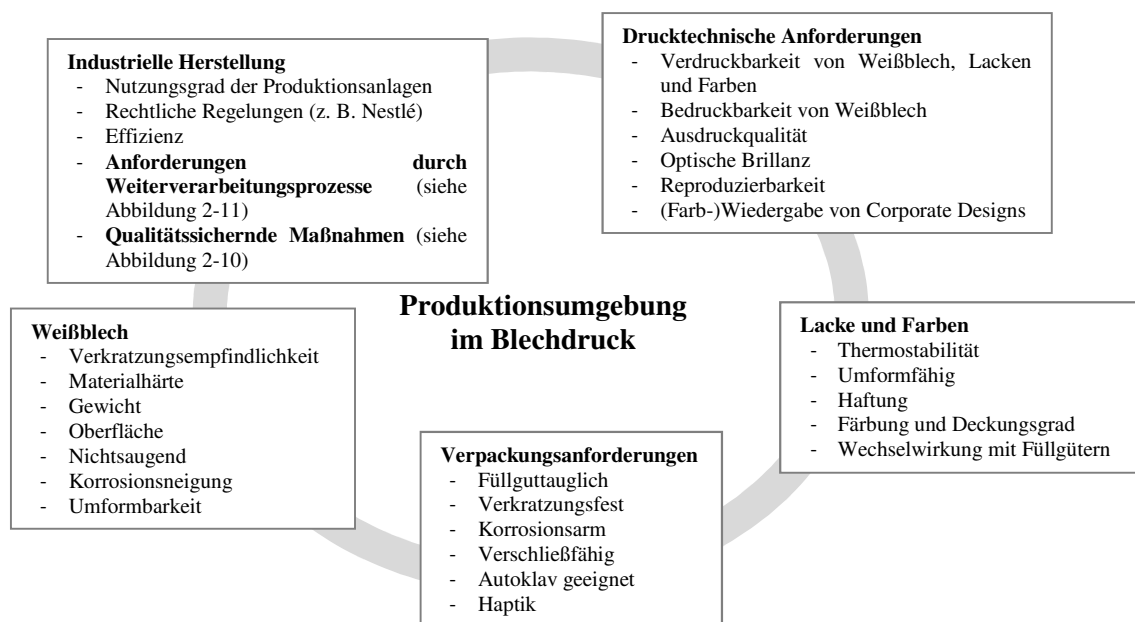


Abbildung 2-9: Produktionsspezifische Anforderungen im Blechdruck [Eigene Darstellung]

Wie für andere Werkstoffe existieren auch im Blechdruck spezifische Anforderungen an die Drucktechnik und die verwendeten Materialien, wie Farben, Lacke und das Weißblech, welche in Abbildung 2-9 entsprechend geordnet sind. Das Weißblech ist im Vergleich zu Papier ein sehr schweres Material, wodurch beispielsweise maschinenbauliche Besonderheiten an den Druckmaschinen oder auch logistische Anforderungen resultieren. Zudem ist Weißblech ein sehr glänzender Werkstoff, was wiederum Auswirkungen auf die Farben und die optische Brillanz des Druckbildes hat. Daneben gilt es auch Verpackungsanforderungen zu berücksichtigen, wie die Verschleißfähigkeit von Gebinden oder die Anforderung an die Farben bei Weiterverarbeitungsprozessen eine Umformfähigkeit aufzuweisen.

Weiterführend sind unter dem Punkt Industrielle Herstellung in Abbildung 2-9 die Unterebenen Qualitätssichernde Maßnahmen und Anforderungen durch Weiterverarbeitungsprozesse aufgeführt, welche auf den folgenden Seiten beschrieben sind.

Bei Metallverpackungen sind im Hinblick auf qualitätssichernde Maßnahmen drei Inspektionsbereiche zu berücksichtigen:

- die Äußere Inspektion des Dosenkörpers,
- die Innere Inspektion des Dosenkörpers und
- die Inspektion des Verschlusses.

Jedem Inspektionsbereich sind in Abbildung 2-10 spezifische Maßnahmen zur Überprüfung der Produktqualität zugeordnet. So ist bspw. bei der inneren Inspektion darauf zu achten, dass der Lack einen ausreichend gleichmäßigen und vor allem vollflächigen Auftrag besitzt, da es sonst zum Kontakt zwischen Füllgut und Weißblech kommen kann, wodurch wiederum Perforationen entstehen können, die das Produkt unbrauchbar machen.

Auch der Lackaussparkontrolle kommt eine besondere Bedeutung zu. Zwischen den auf der Tafel vorliegenden Nutzen sind ca. 5 cm breite unlackierte Lackaussparungen berücksichtigt. Diese sind notwendig, um in der Weiterverarbeitung den Schweißprozess gewährleisten zu können. Im Falle, dass derartige Aussparungen dennoch lackiert werden oder Lackspritzer sich an diesen Stellen niederschlagen, kann es passieren, dass die Schweißnaht unterbrochen wird, da der Lack eine isolierende Wirkung besitzt. Auch in diesem Fall wäre das Produkt unbrauchbar.

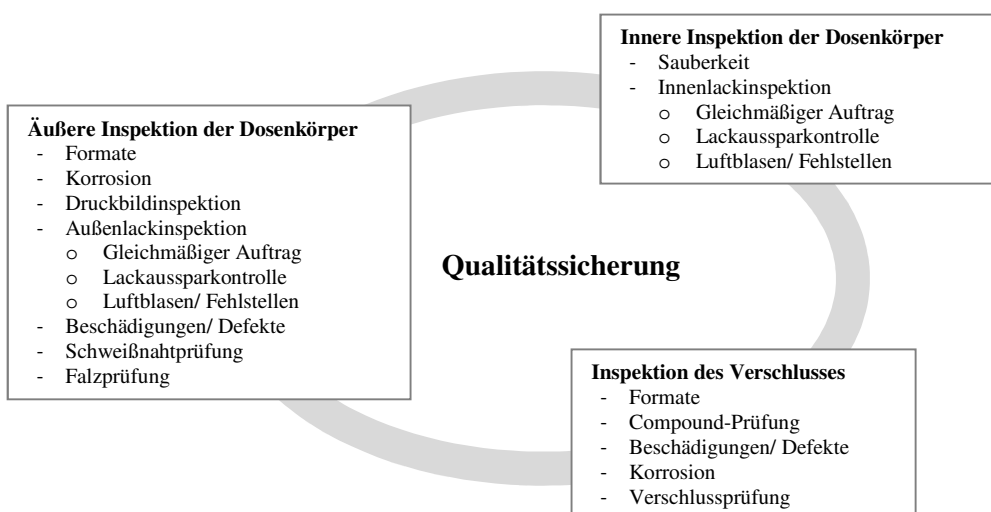


Abbildung 2-10: Qualitätssichernde Prüfungen von Metallverpackungen nach [Coles 2003]

Die industrielle Herstellung von Metallverpackungen stellt zudem besondere Anforderungen aufgrund der typischen Weiterverarbeitungsprozesse. In der folgenden Abbildung 2-11 sind die wesentlichen Anforderungen der Weiterverarbeitung aufgeführt und nach den übergeordneten Prozessen klassifiziert. Dadurch ist es möglich, den jeweiligen Anforderungen spezifische Prüfnormen zuzuordnen (siehe Tabelle 2-3).

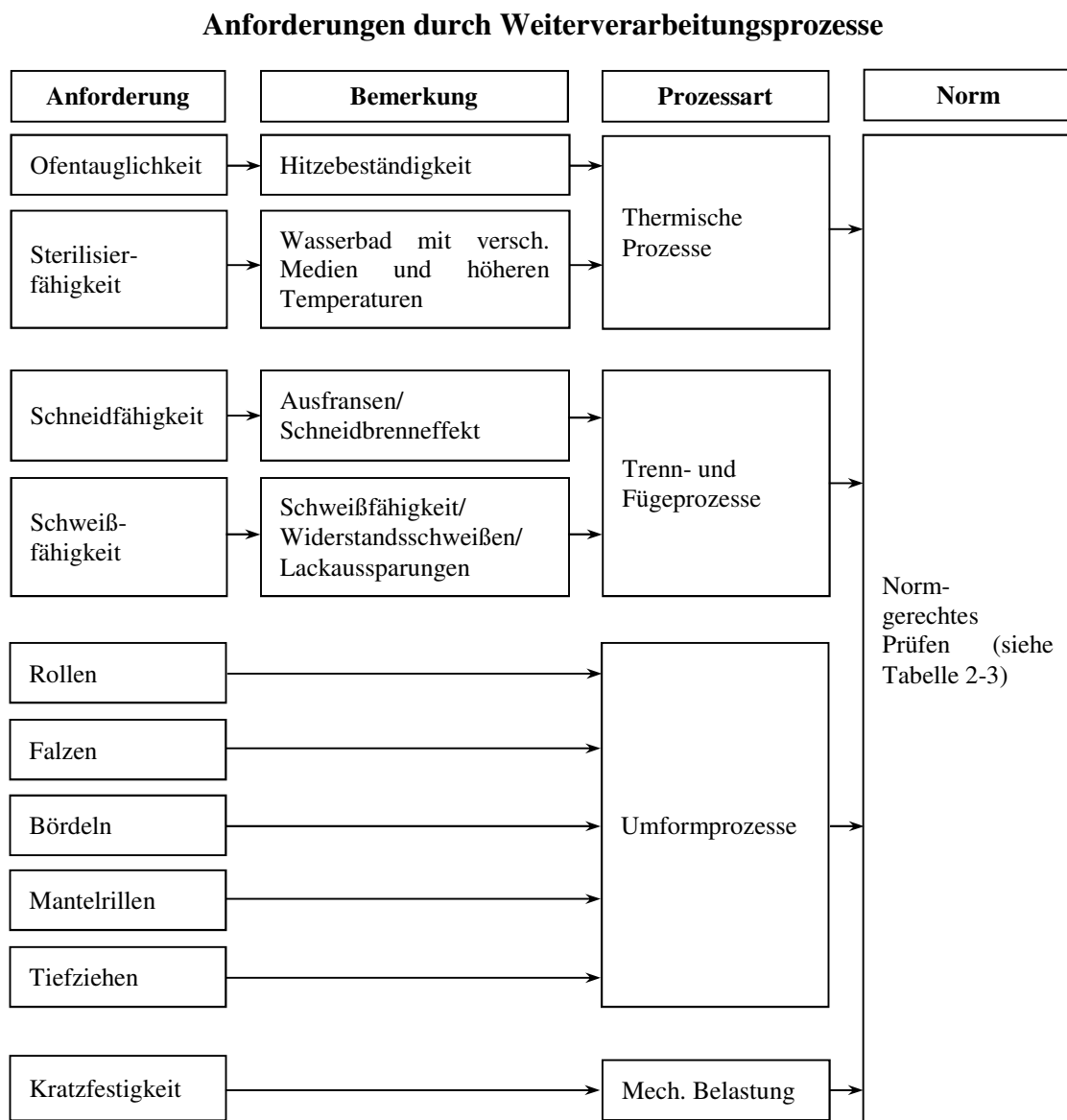


Abbildung 2-11: Anforderungen an das Weißblech sowie Lacke und Farben durch die Weiterverarbeitungsprozesse [eigene Darstellung]

Bei der Entwicklung neuer drucktechnischer Prozesse im Bereich des Blechdrucks sind grundsätzlich Prüfungen durchzuführen, welche den Prozessen der Weiterverarbeitung Rechnung tragen. Ein branchenspezifischer Standard ist derzeit nicht vorhanden.

In der nachfolgenden Tabelle 2-3 sind die aus Abbildung 2-11 abgeleiteten Prüfnormen zusammengetragen und aufgelistet.

Tabelle 2-3: Überblick der Prüfmethoden (Auszug)

Prüfmethode	Norm	Zu prüfende Anforderung
Dornbiegeversuch – mit zylindrischem Dorn	ISO 1519	Umformung
Tiefungsprüfung	ISO 1520	Umformung
Zipfelprüfung an Blechen und Bändern (Beta-Napf)	ISO 1669	Umformung
Gitterschnitttest	ISO 2409	Haftung
Schlagfalttest angelehnt an Schlagfestigkeit	ISO 6272-2	Umformung
Dornbiegeversuch – mit konischem Dorn	ISO 6860	Umformung
Ritzhärte-Prüfung	ISO 15184	Kratzfestigkeit
T-Biegeprüfung	ISO 17132	Umformung
Tiefungsversuch nach Erichsen	ISO 20482	Umformung
Sterilisation	-	Sterilisationsfähigkeit
Ofentauglichkeit	-	Hitzebeständigkeit

Die Prüfnormen sind jedoch lediglich als Einzelprüfungen ausgelegt. Eine Prüfungsreihenfolge mehrerer Prüfungen an einem Prüfling ist nicht vorgeschrieben, kann aber durchgeführt werden, um die Anforderungen der Materialprüfung weiter zu steigern. Ein praxisnahes Prüfen eines Prüflings mit allen Lack- und Druckschichten (Innen-, Außen-, Schutzlack und Druck) sowie mit allen erforderlichen Weiterverarbeitungsprozessen ist mit den vorhandenen Normen nicht möglich. Es stellt sich demnach die Frage, wie eine praxisnahe Prüfung unter Berücksichtigung der vorliegenden Normen gestaltet werden könnte, um zukünftige Entwicklungsrisiken zu minimieren.

Alles in allem sind die Prüfungsnormen jedoch soweit gegeben und ausgereift, dass zumindest eine Indikation auf die prozessrelevanten Anforderungen im Labor nachgebildet werden kann.

2.2 Materialien

Für die Erzeugung von Metallverpackungen werden Bedruckstoffe sowie Auftragsmedien benötigt. Der Bedruckstoff ist in erster Linie Weißblech oder Aluminium. Auf letzteres wird in diesem Kapitel nicht näher eingegangen. Bei den Auftragsmedien kann in Lack und Druckfarbe unterschieden werden.

2.2.1 Weißblech

In diesem Abschnitt wird die Weißblechherstellung näher beschrieben sowie zwischen den verfügbaren Weißblechsorten differenziert. Dazu werden auch die möglichen chemischen Nachbehandlungen, welche zur Passivierung nötig sind, aufgezeigt und verschiedene Öle benannt.

Weißblechherstellung

TK Rasselstein beschreibt den eigenen Herstellungsprozess wie folgt:

„Ausgangsmaterial für die Weißblechherstellung ist warmgewalztes Stahlband. Die Verarbeitung beginnt mit dem Beizen des Warmbandes. Hierbei wird der beim Warmwalzen entstandene Zunder in einer kontinuierlich arbeitenden Durchlaufbeize beseitigt. Als Beizmedium findet Schwefelsäure Verwendung. Das so vorbehandelte Warmband wird dann auf Kaltwalzanlagen (bei Kräften bis $1.200\text{ t} = 12.000\text{ N}$) mit fünf bis sechs Gerüsten, in denen das Band zwischen zwei Arbeitswalzen gewalzt wird, durchgeführt. Das Stahlband verlängert sich dabei entsprechend der Dickenabnahme. Die Walzgeschwindigkeit muss deshalb von Gerüst zu Gerüst höher werden. Um die Dickenverringerung bei hohen Geschwindigkeiten zu ermöglichen, wird der Walzspalt mit einem Gemisch aus Walzöl und Wasser geschmiert. Beim Walzen wird die Dicke des Bandes häufig um mehr als 90 % vermindert. Die dabei eintretende Kaltverfestigung muss durch einen Glühvorgang wieder aufgehoben werden. Vor dem Glühen muss das Band von Verunreinigungen gesäubert werden. Dies geschieht in Entfettungslinien. Der dabei stattfindende Reinigungsprozess beginnt mit dem Bespritzen des Bandes mit heißer Lauge. Mittels Bürsten wird ein Großteil des Walzöls entfernt. In der anschließenden elektrolytischen Entfettung wird das Band metallisch rein und ein silikathaltiger Schutzfilm wird abgeschieden. Nach einem zweiten Bürstengang wird das Band gespült, getrocknet und zu Rollen aufgewickelt. Durch die Formänderung beim Kaltwalzen wird das Band hart und spröde und ist in diesem Zustand als Verpackungswerkstoff nicht geeignet. Das rekristallisierende Glühen des entfetteten Bandes stellt die notwendige Verformbarkeit wieder her.

Hierfür gibt es zwei Verfahren. Mit dem Hauben-Glühverfahren wird in einem mehrtägigen Behandlungsprozess, der Aufheizen und Abkühlen umfasst, die zerstörte Kristallstruktur wiederhergestellt. Das Durchlauf-Glühverfahren besteht aus einem schnellen, kontinuierlichen Durchlauf des Bandes durch eine unter Schutzgas stehende Glühofenanlage. Das Schutzgas verhindert die Oxidation der Bandoberfläche. Das kurzzeitgeglühte Band ist etwas härter als das im Haubenofen behandelte Material. Durch das rekristallisierende Glühen ist zwar die Kristallstruktur wiederhergestellt, das geblühte Material kann aber noch nicht für die Verarbeitung zu Weißblechverpackungen eingesetzt werden, da starke Knicke und ungleichmäßiges Umformverhalten auftreten würden (Fließfigurenbildung). Um dem Band die erforderlichen Umformeigenschaften zu geben, erfolgt nach dem Glühen ein trockenes Nachwalzen, auch Dressieren genannt. Nach dem Dressieren gilt das Band als Feinstblech. Erst durch die weiteren Veredelungsprozesse durch Verzinnung oder Verchromung wird das Feinstblech zu Weißblech. In den Verzinnungsanlagen wird das Band zunächst gründlich durch eine elektrolytische, alkalische Behandlung und durch Beizen gereinigt. Das Band gelangt anschließend in den zinnhaltigen Elektrolyten. Dort wird es als Kathode zwischen zwei Reihen Zinnanoden hindurchgeführt. Mithilfe des elektrischen Stroms wird das Zinn der Anoden gelöst und auf dem Band abgeschieden. Durch anschließendes Erwärmen des Bandes über den Zinnschmelzpunkt von 232 °C und Abschrecken in Wasser wird danach der Glanz des elektrolytisch verzinnnten Weißbleches erzielt. Die Zinnschicht verbessert den Korrosionsschutz, der durch eine chemische Nachbehandlung (Passivierung) optimiert wird. Eine Einölung verbessert die Gleiteigenschaften bei der späteren Verarbeitung. In einem der Verzinnung ähnlichen Prozess wird auch spezialverchromtes Feinstblech hergestellt, das international die Bezeichnung Electrolytic Chromium Coated Steel/ Tin Free Steel (ECCS/ TFS) trägt. Das Weißblech wird vornehmlich in Form von Coils abgenommen, andernfalls wird es auf Querteilanlagen in gewünschte Abmessungen geschnitten oder auf einer Scrollschere zu Tafeln mit Formschnitt abgelängt. Durch Spalten des Bandes in Längsrichtung entstehen Schmalbandringe.“ [TK Rasselstein 2015a]

Das folgende Flussdiagramm in Abbildung 2-12 zeigt den Herstellungsprozess von kaltgewalztem Weißblech nochmals schematisch:

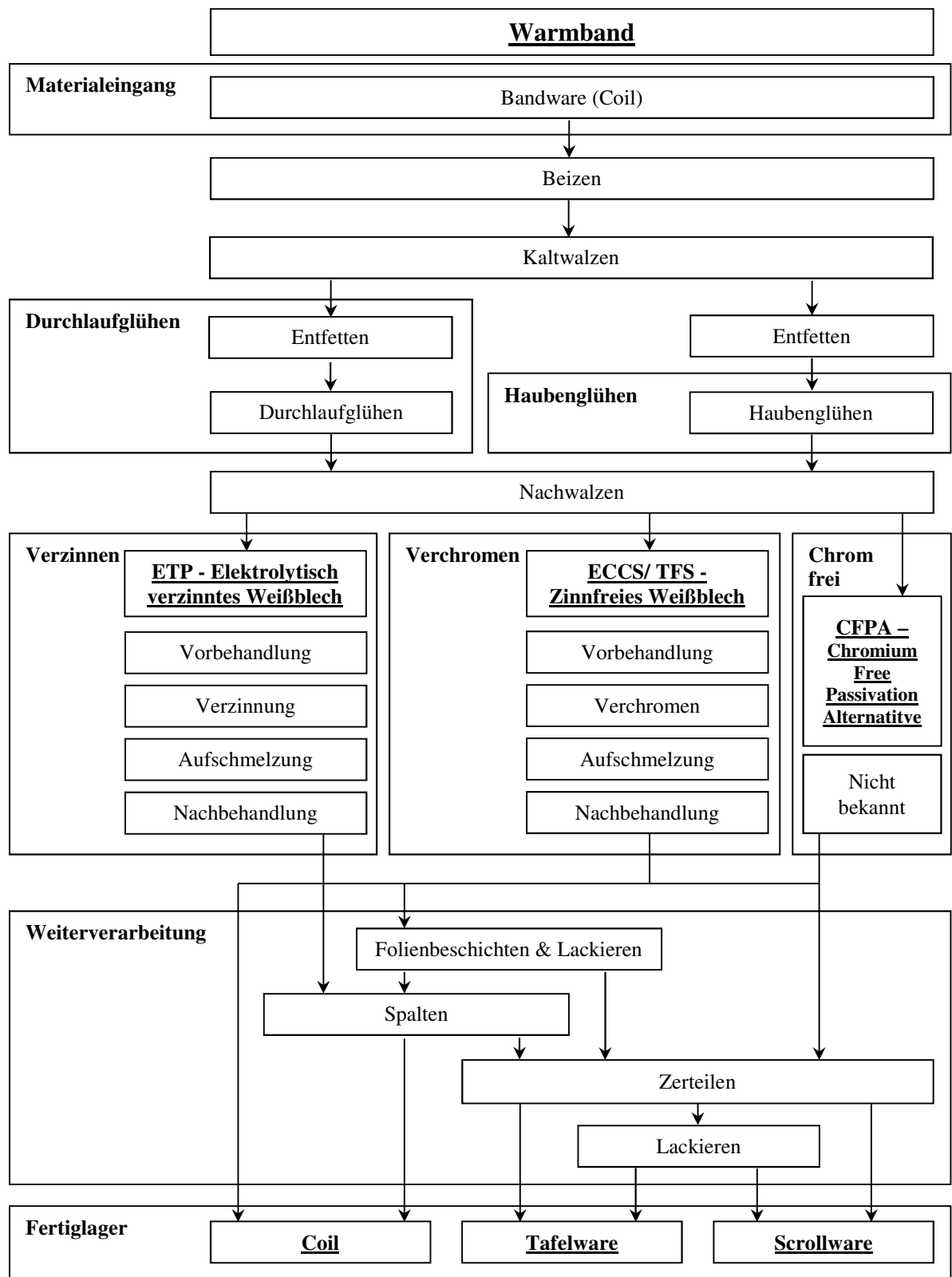


Abbildung 2-12: Flussdiagramm zur Weißblechherstellung nach [TK Rasselstein 2015a]

Während des Herstellungsprozesses findet eine chemische Nachbehandlung des Weißbleches statt, welche als Passivierung bezeichnet wird. Zweck der Passivierung ist ein verbesserter Korrosionsschutz zusätzlich zur Verzinnung oder Verchromung [TK Rasselstein 2015a]. Die nachfolgende Tabelle 2-4 benennt die typischen, im Einsatz befindlichen Passivierungen und gibt zudem Auskunft über die übliche Passivierungskennung sowie den Chromgehalt der jeweiligen Passivierung:

Tabelle 2-4: Überblick der sich in Anwendung befindlichen Passivierungen [TK Rasselstein 2015b, TK Rasselstein 2015c]

Passivierungskennung	Chromgehalt [mg(Cr)/m ²]	Verfahren
300	< 3	Tauchpassivierung
311	3 – 9	Elektrochemische Passivierung
314	> 7	Elektrochemische Passivierung
505	-	Chromfrei

Die nachfolgende Tabelle 2-5 benennt die für die Weißblechherstellung relevanten Ölsorten, welche bei der Weißblechherstellung zum Einsatz kommen und für verbesserte Gleiteigenschaften bei der späteren Verarbeitung sorgen [TK Rasselstein 2015a]. Ein auf ein Weißblech aufgetragenes Öl wird als Ölaufgabe bezeichnet.

Tabelle 2-5: Überblick der eingesetzten Ölsorten [Arcelor 2017, TK Rasselstein 2015a]

Abkürzung	Ölsorte	Summenformel
DOS	Diethylsebacat	C ₂₆ H ₅₀ O ₄
ATBC	Acetyltributylcitrat	C ₂₀ H ₃₄ O ₈
BSO	(n)-Butyl Stearate Öl	C ₂₂ H ₄₄ O ₂

Weißblech kann, wie bereits erwähnt in drei Sorten unterschieden werden:

- ECCS/ TFS : Elektrolytic Chromium Coated Steel/ Tin Free Steel,
- ETP : Electrolytic Tin Plate und
- CFPA : Chromium Free Passivation Alternative.

In den folgenden Abbildung 2-13 und Abbildung 2-14 wird der unterschiedliche Aufbau von elektrolytisch verzinnem (ETP) und verchromtem (ECCS/ TFS) Weißblech gezeigt.

ETP (Electrolytic Tin Plate) – Elektrolytisch verzinnertes Weißblech

Elektrolytisch verzinnertes Weißblech ist für alle Anwendungen im Bereich der Metallverpackungen geeignet. Vornehmlich im DWI-Verfahren stellt ETP das wesentliche Weißblech dar, da es leicht zu bearbeiten respektive zu umformen ist. Die Oberfläche wirkt auf den Betrachter brillant und erlaubt einen guten Kontrast zwischen Weißblech und Druckbild [TK Rasselstein 2015b]. Das auf die Weißblechsorte ETP aufgetragene Zinn wird als Zinnauflage bezeichnet und wird in der Praxis mit $[g/m^{-1}]$ angegeben (während in Abbildung 2-13 die Schichtdicke exemplarisch dargestellt ist).

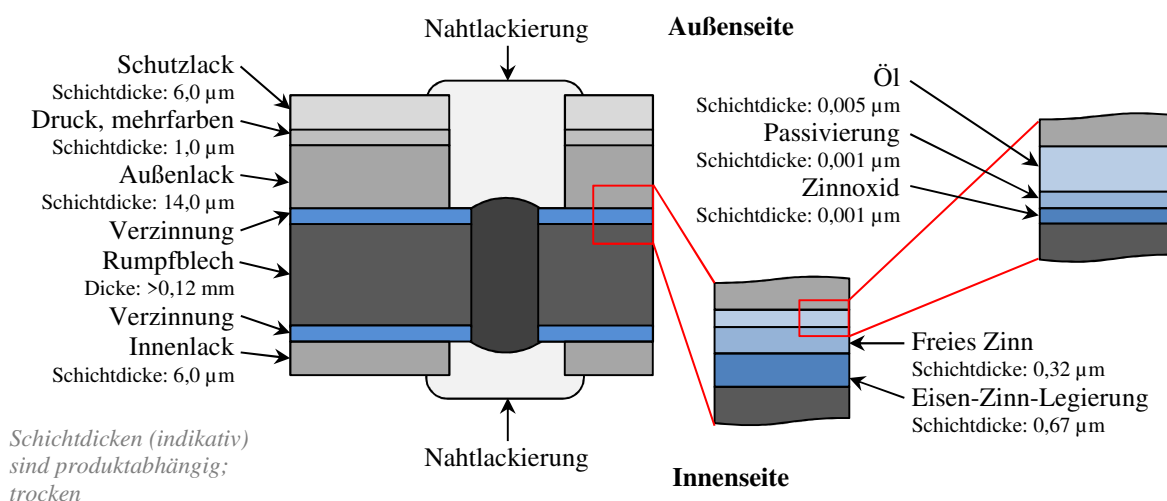


Abbildung 2-13: Aufbau von elektrolytisch verzinnemtem Weißblech (ETP) nach [TK Rasselstein 2015b]

Zur Stabilisierung der Oberfläche bzw. um weiteres Wachstum von Zinnoxiden zu verhindern, wird ETP passiviert. Die häufigste Anwendung ist die Passivierung 311 (siehe Tabelle 2-4), eine elektrochemische Behandlung mit Natriumdichromat ($Na_2Cr_2O_7$), um metallisches Chrom in ausreichendem Gehalt auf der Zinnoberfläche abzuscheiden. Chrom(VI) wurde durch die Europäische Union innerhalb der REACH-Verordnung aufgeführt. Daher ist das Ziel aktueller Entwicklungen, bis zum Jahr 2021 eine alternative chromfreie Passivierung anzubieten, mit der eine Begrenzung des Zinnoxidwachstums auf der Weißblechoberfläche zu erzielen ist. Aktuell finden Untersuchungen zu einem Titan/

Zirkonium-Verbund statt, welcher direkt nach der Verzinnung auf die Bandoberfläche appliziert wird [Arcelor 2017]. Diese Weißblechvariante wird als CFPA (Chromium Free Passivation Alternative) bezeichnet.

ECCS/ TFS (Elektrolytic Chromium Coated Steel/ Tin Free Steel) – Zinnfreies

Weißblech

ECCS/ TFS kann heute überall dort eingesetzt werden, wo nicht geschweißt wird [TK Rasselstein 2015a]. Es weist eine hohe Haftung für Lacke und Folien auf. Wobei ECCS grundsätzlich zu Lackieren ist, da ansonsten Schäden an Bearbeitungswerkzeugen entstehen. Bei Anwendungen für Füllgüter mit niedrigem pH-Wert ($\text{pH} < 4$) können aufgrund des Chromoxids schwarze Verfärbungen respektive Korrosionsschäden auf dem Weißblech entstehen. Die optische Erscheinung der Oberfläche ist matt und weist eine geringe Helligkeit auf, sodass keine spiegelnden Effekte erzielt werden können [TK Rasselstein 2015b].

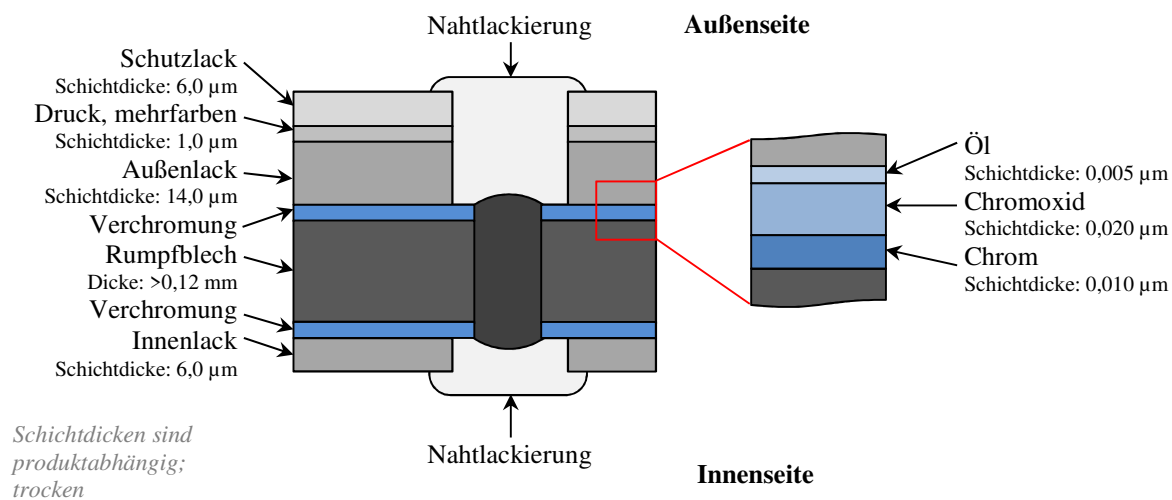


Abbildung 2-14: Aufbau von zinnfreiem Weißblech (ECCS/ TFS) nach [TK Rasselstein 2015b]

Die Chrombeschichtung wurde in erster Linie als wirtschaftliche Alternative zur Verzinnung entwickelt. Doch auch ECCS ist nicht REACH-konform, sodass für alle derzeit im Einsatz befindlichen Weißblechsorten für den europäischen Raum Alternativen gefunden werden müssen [Arcelor 2017].

2.2.2 Lacke

Die Lackierung stellt einen wesentlichen Prozess im Blechdruck dar. Sie schützt das Weißblech vor Korrosionsschäden und muss das Endprodukt (die Metallverpackung) an allen Oberflächen umschließen. Dadurch sind Lackierprozesse in mehreren Durchläufen notwendig.

Funktionen der Lackierung und Differenzierung der Lackschichten

Die wesentlichen Funktionen der Lackierung sind wie folgt definiert [Turner 1998]:

- Schutz des Weißblechs vor dem Füllgut.
- Vermeidung einer Kontamination des Füllgutes durch Bestandteile des Weißblechs.
- Erleichterung von Weiterverarbeitungsprozessen.
- Die Basis für den Druck und die Produktidentifizierung.
- Bildung einer Barriere gegen äußere Korrosion und Abrieb.

Die Lacke selbst sind i. d. R. lösemittelhaltig und trocknen physikalisch. Als Ausnahmen seien die Schutzlacke genannt, welche auch mittels UV-Strahlung gehärtet werden können sowie die Pulverlacke zur Nahtlackierung.

Lacke müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, um im Blechdruck eingesetzt werden zu können. Neben allgemeinen blechdruckspezifischen Anforderungen wie:

- Thermostabilität,
- Umformfähigkeit,
- Haftung,
- Färbung und Deckungsgrad und
- Wechselwirkung mit Füllgütern

spielen auch die drucktechnischen Anforderungen eine wichtige Rolle, um eine generelle Verdruckbarkeit zu gewährleisten. Die wesentlichen Lackschichten sind:

- Innenlack,
- Außenlack,
- Schutzlack.

Die folgende Tabelle 2-6 gliedert die Lackschichten für Metallverpackungen nach Innen-, Außen- und Schutzlack (ohne UV-Anwendungen):

Tabelle 2-6: Überblick der Lackschichten für Metallverpackungen [Kittel 2008]

Lack-schichten	Typ/ Bezeichnung	Segment	Pigmentierung	Harzkombination
Innenlack	Nahtschutzlack	3-Teil	Farblos/ pigmentiert	Pulverlack
	Haftlack	3-Teil	Eingefärbt	Epoxy/ Phenol
			Farblos/ pigmentiert	Polyester/ PVC
	Spritzlack	2-Teil	Farblos/ pigmentiert	Wässriger EP/ Phenol
		1-Teil	Gold	Epoxy/ Phenol
	Schutzlack	3-Teil	Gold	Epoxy/ Phenol
			Aluminium	Epoxy/ Phenol
			Weiß	Epoxy/ Phenol
Außenlack	Nahtschutzlack	3-Teil	Farblos/ pigmentiert	Pulverlack
	Schutzlack	3-Teil	Gold	Epoxy/ Phenol
	Walzlack	2-Teil	Weiß	Polyester
	Stanzlack	3-Teil	Weiß	Polyester oder Alkyd
	Grundlack	3-Teil	Klar	Polyester oder Alkyd
			Beige	Epoxy/ Phenol
		1-Teil	Weiß	Polyester
Schutzlack	Silberlack	3-Teil	Farblos	Polyester, Alkyd oder Epoxidharzester
		3-Teil	Farblos	Wässriger Polyester
	Überzugslack	3-Teil	Eingefärbt	Polyester, Alkyd oder Epoxidharzester

Die Bezeichnungen der einzelnen Lacke variieren je nach Einsatzgebiet (siehe Spalte: Typ/ Bezeichnung), können aber den allgemeinen Lackschichten Innen-, Außen- und Schutzlack zugeordnet werden.

Die nachfolgende Tabelle 2-7 zeigt die am häufigsten verwendeten Lösemittel für Lacke im Blechdruck.

Tabelle 2-7: Überblick der am häufigsten verwendeten Lösemittel für Lacke im Blechdruck [Sun 2017]

Lösemittel	Summenformel
Solvent Naphtha	diverse
Butylglycol	$C_6H_{14}O_2$
Methoxypropanol	$C_4H_{10}O_2$
Methoxypropanolazetat	$C_6H_{12}O_3$
Butanol	$C_4H_{10}O$
Dibasische Ester	$C_6H_{14}O_4$
Cyclohexanon	$C_6H_{10}O$

Die in Tabelle 2-7 aufgeführten Lösemittel sollen an dieser Stelle lediglich benannt sein, um einen Überblick der verwendeten Lösemittel zu erlangen.

Lackschicht: Innenlack

Die Basis der Innenlacke bilden Epoxidharze, welche eine sehr gute Barrierewirkung ggü. Lebensmitteln aufweisen. Diese ist notwendig, um Geschmacksveränderungen des Füllguts zu vermeiden. Zudem sind Gleitmittel enthalten, wodurch Ziehprozesse in der Weiterverarbeitung begünstigt werden [Kittel 2008]. Epoxidharze auf Basis von Bisphenol A finden die häufigste Verwendung bei Innenlacken und sind für alle Arten von Nahrungsmitteln, wie Fleisch, Fisch, Gemüse und Früchte geeignet [Coles 2003]. Der aufgetragene Lack (z. B. Epoxylack) besitzt haftvermittelnde Eigenschaften zum Untergrund. Die im Lack enthaltenen Lösemittel dampfen im Trocknungsprozess ab und der Lack vernetzt unter der Temperatureinwirkung. Im Vergleich zur unlackierten Oberfläche des Weißblechs weist der verwendete Lack eine wesentlich höhere Oberflächenspannung und damit bessere Adhäsionseigenschaften auf. Deshalb können Druckfarben auf den Lack aufgebracht werden, deren Oberflächenspannungen ebenfalls relativ hoch sind [Ludin und Wagner 2012]. Eine weitere wichtige Eigenschaft des Lacks stellt die Tiefziehfähigkeit dar.

Lackschicht: Außenlack

Die wesentliche Funktion des (weißen) Außenlacks ist, dem Druckbild einen hellen Untergrund zu verschaffen, um ein kontrastreiches Dekor zu erhalten. Im Gegensatz zu den Innenlacken ist die Basis von Außenlacken vom Typ Stanzlack, Polyester oder Alkydharz. Letztere unterscheiden sich von Polyester dadurch, dass diese mit natürlichen Trockenölen, wie Leinsamen, modifiziert sind [Turner 1998].

Lackschicht: Schutzlack

Farblose Schutzlacke werden als Silberlack bezeichnet und bestehen auf Basis von Polyester, Alkyd oder Epoxidharzester. Ist der Schutzlack eingefärbt, so spricht man von Überzugslacken auf gleicher Basis wie Silberlack. Zudem sind in der Praxis sowohl Schutzlacke mit thermischer Trocknung als auch UV-härtende Systeme im Einsatz. Schutzlacke werden verwendet, um das Druckbild vor mechanischen Beanspruchungen zu schützen.

2.2.3 Druckfarben

Wie bei den Schutzlacken befinden sich für die Druckfarben sowohl thermisch-trocknende Systeme als auch UV-härtende Systeme im Einsatz. In erster Linie erfüllen Druckfarben rein dekorative Zwecke, müssen zudem aber über eine gute Sterilisier- und Tiefziehfähigkeit verfügen. Zum Auftrag eines farbigen Druckbildes kann zwischen zwei wesentlichen Typen unterschieden werden:

- Druck auf Außenlack vom Typ Stanzlack (Weiß) für ein brillantes und kontraststarkes Druckbild.
- Druck auf Außenlack vom Typ Grundlack (klar), um den vom Weißblech ausgehenden Metallic-Effekt zur Geltung zu bringen [Turner 1998].

Welcher Typ des Außenlacks gewählt wird, hängt ganz davon ab, wie die Produktmarke später wahrgenommen und präsentiert werden soll. Es ist zudem möglich, die Druckfarbe ohne eine Lackierung direkt auf das Weißblech zu drucken. Dieser Fall ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und sei an dieser Stelle lediglich benannt.

2.3 Trocknungs- und Härtingsverfahren

2.3.1 Thermische Trocknung

Innerhalb von Trocknern werden die Tafeln mit aufgeheizter Luft umströmt. Der Wärmeübergang erfolgt dabei konvektiv. Daher werden die Trockner auch als Konvektionstrockner bezeichnet. Die plan liegenden Tafeln werden mittels Drahtrahmen aufgerichtet und durch die Durchlaufkammer des Konvektionstrockners senkrecht transportiert. Die in die Durchlaufkammer eingebrachte Luft weist eine Temperatur von ca. 200°C auf. Durch das Umströmen der Tafeln mit der aufgeheizten Luft, steigt auch die Temperatur der Tafel. Die Phasen des Wärmeprofiles der Tafel innerhalb der Durchlaufkammer untergliedern sich in Aufheizzone, Einbrennzone und Abkühlzone. Die Aufheizzone ist der Bereich, den die Tafel benötigt, um die Zieltemperatur zu erreichen. Die Einbrennzone definiert die Trocknerstrecke zur Trocknung der Lackschicht. In der letzten Zone kühlen die Tafeln ab und verlassen anschließend den Trockner. In Abbildung 2-15 ist der Konvektionstrockner mit zugeordnetem Wärmeprofil schematisch dargestellt. Eine schematische Darstellung der Luftzirkulation innerhalb der Durchlaufkammer ist in Abbildung 2-16 als Querschnitt dargestellt.

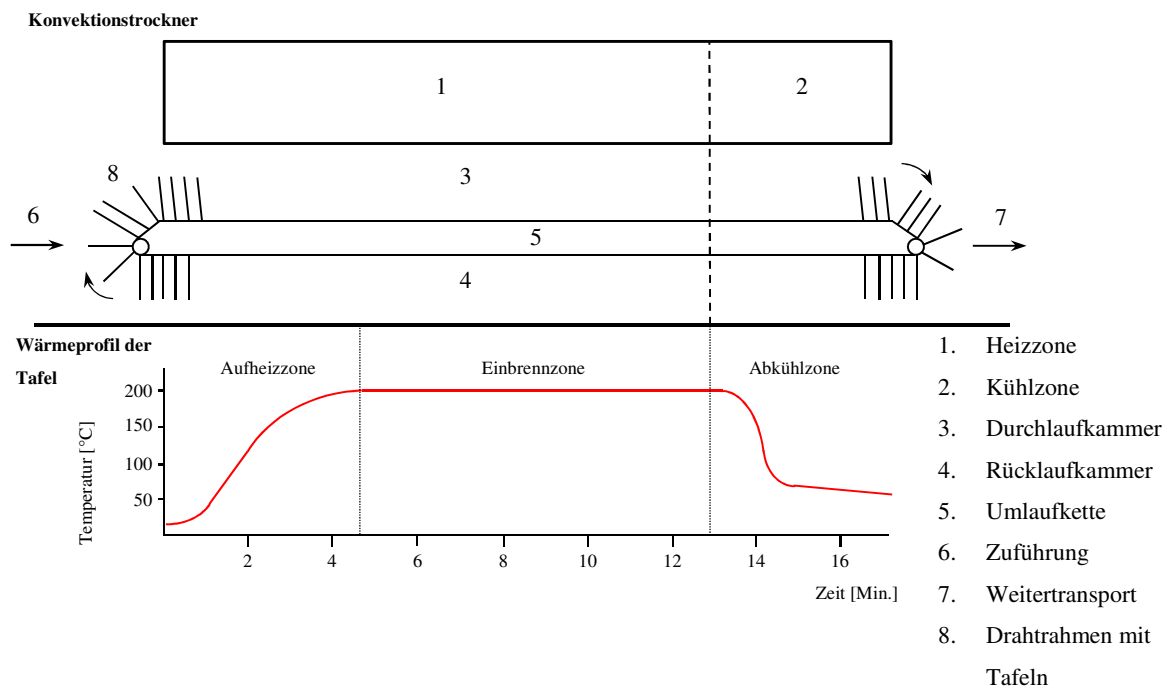


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung des Konvektionstrockners mit Wärmeprofil des Weißblechs während des Trocknerdurchlaufes, gegliedert in die Aufheizzone, Einbrennzone und Abkühlzone nach [KBA 2017a, Turner 1998]

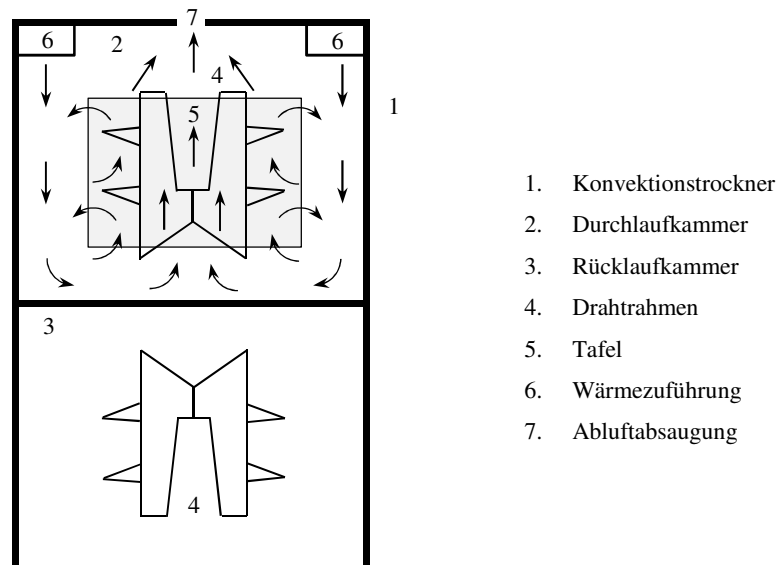


Abbildung 2-16: Schematischer Querschnitt eines Konvektionstrockners während des Trocknungsprozesses mit zusätzlich dargestellter Luftzirkulation nach [KBA 2017a, Turner 1998]; Obere Durchlaufkammer mit Tafel auf Drahtrahmen und Wärmestrom, untere Rücklaufkammer der Drahtrahmen ohne Tafel

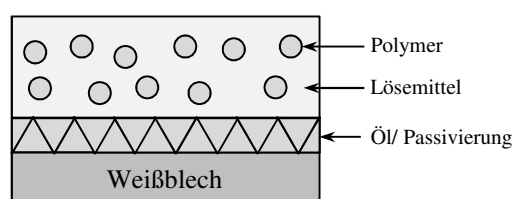
Eine Kenntnis über die Luftströme innerhalb der Durchlaufkammer des Trockners (wie in Abbildung 2-16 dargestellt) ist insofern relevant, da als Faustregel für die ausreichende Trocknung in Konvektionstrocknern gilt, dass der Wärmestrom in den Film bzw. die Tafel umso höher ist, je

- schneller der Film von der Trocknerluft umströmt wird und je
- höher die Lufttemperatur über der Temperatur der Filmoberfläche liegt [Mischke 2007].

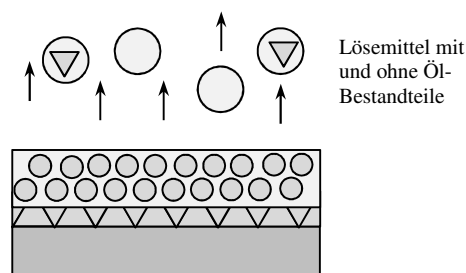
Während die Tafeln durch den Trockner transportiert werden, verdunstet das im Lackfilm enthaltene Lösemittel aufgrund der Wärmezufuhr und wird über die Abluftabsaugung aus der Durchlaufkammer abtransportiert. Dabei verfestigt sich der Lackfilm auf der Tafel mit einer für die Weiterverarbeitungsprozesse notwendigen Haftung. Die Haftungs- respektive Adhäsionsqualität wird im Allgemeinen durch verschiedene mechanische, physikalische und chemische Wechselwirkungen zwischen Lack und Weißblechoberfläche beeinflusst. Lacke benötigen grundsätzlich homogene Oberflächen, um starke chemische Bindungen erzeugen zu können, die zu einer ausreichenden Haftung führen. Jegliche Einflüsse, die eine Inhomogenität erzeugen, schwächen die Adhäsion des Lacks. Hohe Passivierungsschichten sind ein derartiger Einfluss und führen zu einer verminderten Lackhaftung. Allerdings sind

diese notwendig, um im Falle von ETP ein übermäßiges Zinnoxidwachstum zu verhindern. Dieses führt, wenn es nicht verhindert wird, zu einer gelblichen Schwefelfärbung auf dem Weißblech. Die auf dem Weißblech aufliegende Einölung dient dem Zweck einer besseren Verarbeitung des Weißbleches. Das Öl schafft zudem eine extrem homogene Oberfläche, selbst bei hochpassiviertem ETP [TK Rasselstein 2015b]. Abbildung 2-17 zeigt das physikalische Trocknungsmodell von Lack:

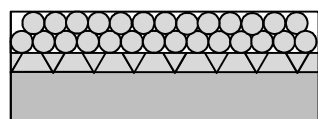
a) Nasser Lackfilm auf Weißblech



b) Volumenreduktion während der Verdunstung



c) Kapillarbildung der im Lack enthaltenen Polymere



d) Trockener Film

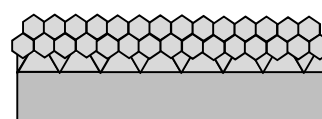


Abbildung 2-17: Physikalisches Trocknungsmodell: a) Verdunstung des Lösemittels durch Wärmezufuhr b) Volumenreduktion des Lackauftrags sowie Vermischung und Herauslösung der öligen Bestandteile auf der Weißblechoberfläche c) Kapillarbildung der im Lack enthaltenen Polymere d) Formierung zu einem festen und trockenen Lackfilm nach [Brinkmann 2011, Goldschmidt 2007]

Nach dem Druck des Lackes (a) und während des Verdunstungsprozesses des Lösemittels (b) kommt es zu einer Reaktion zwischen den Adhäsionsgruppen im Lack und den Oxiden der Passivierung. Bestandteile des Öls werden dabei von den Harzen umschlossen und verbleiben auf dem Weißblech. Das sich herauslösende Lösemittel trennt während der Verdunstung sowohl Bestandteile des Öls als auch lackeigene Pigmente und Harzmoleküle heraus (b). Diese Bestandteile lagern sich innerhalb des Trockners als kondensierter Niederschlag ab. Als getrockneter Lackfilm bleibt somit eine Verbindung von Passivierung mit Harzen, Pigmenten (sowie sonstigen Additiven des Lacks) und Öl zurück (d).

2.3.2 UV-Strahlenhärtung

Neben der thermischen (physikalischen) Trocknung gibt es auch die Möglichkeit, eine Lack- bzw. Farbschicht mittels UV-Strahlen (chemisch) zu härten. Im Bereich des Blechdrucks sind bereits Anwendungen für die Druckfarben- und Schutzlackhärtung im Einsatz. Dieser Abschnitt soll im Folgenden einen Überblick über die Möglichkeiten von UV-Strahlenhärtung geben. Als UV-Strahlung wird der kurzwellige Bereich von 100 nm – 380 nm im Wellenspektrum bezeichnet, welcher sich nach DIN 5031 Teil 7 [DIN 5031] folgendermaßen aufteilt [Jüstel 2014, Pieke 2009], siehe hierzu auch Abbildung 2-18 zur Einordnung:

- V-UV: 100 nm – 200 nm
- UV-C: 200 nm – 280 nm
- UV-B: 280 nm – 315 nm
- UV-A: 315 nm – 380 nm

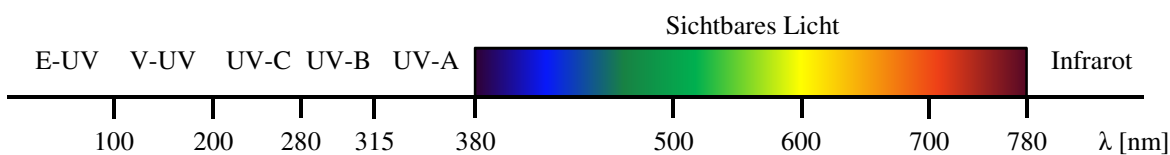


Abbildung 2-18: Übersicht zum Wellenspektrum im Bereich 100 - 780 nm nach [Teschner 1991]

Zur UV-Härtung werden entsprechende Strahlungseinrichtungen benötigt. Diese sind im prinzipiellen Aufbau für die Einsatzgebiete in der grafischen Industrie ähnlich, unterscheiden sich aber je nach dem gewünschten Einsatzgebiet in der Art der Strahlungsquelle, respektive dem wirkenden Wellenlängenbereich. In der nebenstehenden Abbildung 2-19 ist der Aufbau eines UV-Strahlers schematisch dargestellt.

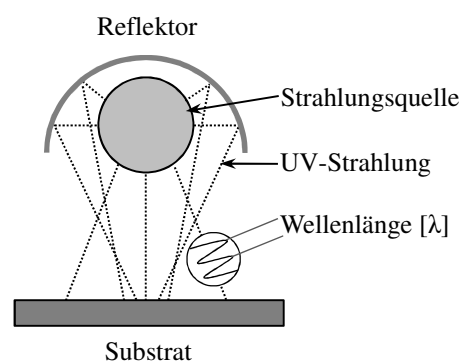


Abbildung 2-19: Schematischer Aufbau einer UV-Strahlungseinrichtung nach [BG ETEM o. J., BG Druck 2007]

Ein UV-Strahler besteht aus den zwei wesentlichen Baugruppen Strahlungsquelle und Reflektor, welcher die UV-Strahlung in Richtung des Substrates lenkt.

Der Strahlungsquellentyp ist der wesentliche Klassifizierungsfaktor für UV-Strahlungssysteme. Neben Entladungslampen gibt es auch Ausführungen mittels Laserstrahlen oder LEDs (Light Emitting Diodes).

Die Tabelle 2-8 zeigt einen Überblick zu verschiedenen Strahlungstypen (z. B. LED oder Hg-Entladungslampen), Strahlungsquellen respektive Dotierungen sowie den entsprechenden Wellenlängen. Die Tabelle 2-8 zeigt lediglich einen Auszug. Neben den dargestellten existieren eine Vielzahl weiterer Strahlungsquellen und Dotierungen.

Tabelle 2-8: Überblick zu verschiedenen Strahlungsquellen und deren Wellenlängenbereichen; Auszug [Jüstel 2017]

Strahlungsart/ Typ	Strahlungsquelle/ Dotierung	λ [nm]
Sonne	Sonnenstrahlen	> 300 nm
Hg-Entladungslampen	Niederdruck	185, 254 nm
	Amalgam	185, 254 nm
	Mitteldruck	200 – 400 nm
Xe-Entladungslampen	Xe	230 – 800 nm
D ₂ -Entladungslampen	D ₂	110 – 400 nm
Excimer-Laser	Laserstrahlen	193 nm
Excimer-Entladungslampen	Xe ₂ *	172 nm
	KrCl*	222 nm
	XeBr*	282 nm
	XeCl*	308 nm
LED	(Al,Ga)N LEDs	205 – 365 nm
	(In,Ga)N LEDs	365 – 400 nm

*Der bei den Strahlungsquellen der Excimer Entladungslampen angedeutete * zeigt an, dass das es sich hierbei um angeregte Atome handelt [Paravia 2010].*

UV-Farb- und Lacksysteme bilden eine besondere Gruppe innerhalb der Vielzahl an Farbsystemen der grafischen Industrie. Einen wesentlichen Vorteil stellen die sehr kurzen Zeiten (innerhalb von Sekundenbruchteilen [Hoenle o. J.]) dar, welche die verdruckte Nassschicht benötigt, um zu härten.

In der nachfolgenden Abbildung 2-20 das chemische Härungsmodell von UV-Farben dargestellt:

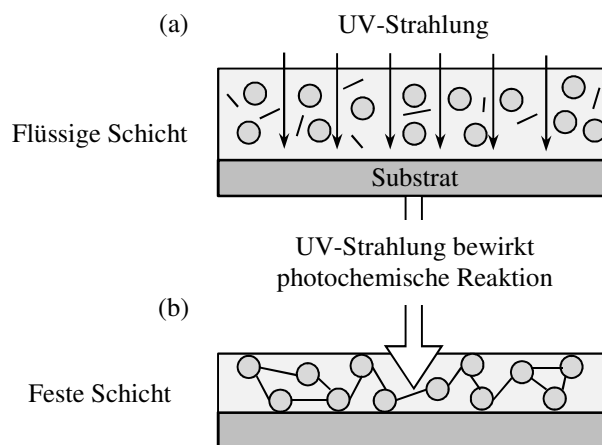


Abbildung 2-20: Chemisches Härungsmodell: UV-Härtung nach [Hoenle o. J., BG Druck 2007]

Sobald die Reaktion durch die UV-Strahlung ausgelöst wurde (a), vernetzt die flüssige Schicht zu einem inerten Film als feste Schicht (b) [Hoenle o. J.]. Die Aushärtemechanismen von UV-Systemen können wiederum in zwei Gruppen, deren Reaktionsmechanismen sich grundlegend voneinander unterscheiden, eingeteilt werden [Pieke 2009, Tafelmeier o. J., Turner 1998]:

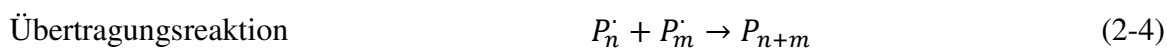
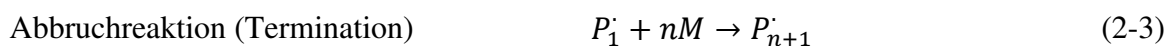
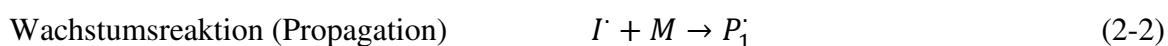
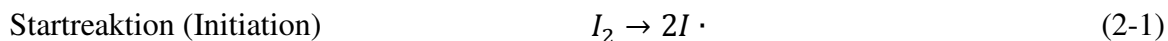
- Kationisch – mit Epoxidharzen
- Radikalisch – mit Acrylatharzen.

Kationische Polymerisation

In kationischen Systemen bilden die Photoinitiatoren durch Photolyse starke Säuren, die eine kationische Ringöffnungspolymerisation auslösen. Die im Lack gebildeten Säuren sind so lange aktiv, bis deren Reaktion abgeschlossen ist (auch dann noch, wenn keine Strahlung weiter einwirkt). Dadurch ergeben sich relativ geringe Härtungsgeschwindigkeiten. Die Vorteile von kationischen Systemen sind Luftunempfindlichkeit und ein geringer Schrumpf während der Härtung [Brock 2012, Pieke 2009].

Radikalische Polymerisation

Das weitaus verbreitetere Härtungssystem ist die radikalische Polymerisation, welche sich in Teilreaktionen (2-1) bis (2-4) gliedern lässt. Hierbei sind I_2 der Initiator, $I\cdot$ ein Initiatorradikal, M das Monomer, sowie $P_n\cdot$ und $P_m\cdot$ die wachsenden Polymerradikale mit den Kettenlängen n und m [Berdzinski 2014, Odian 2004].



UV-Systeme

Die Zusammensetzung der Bestandteile von UV-Systemen lassen sich in Bindemittel, Reaktivverdünner, Pigmente, Additive und Photoinitiatoren untergliedern. Die Bindemittel bilden das Grundgerüst des UV-Systems und bestehen zumeist aus Acrylaten mit chemisch stabilen C=C-Doppelbindungen. Sie bestimmen, je nach Menge der funktionellen Gruppen, neben der Viskosität auch den Grad der möglichen Vernetzung sowie den Volumenschrumpf während des Härtungsprozesses. Die Bestimmung des Applikationsverfahrens entscheidet über die Wahl des entsprechenden Reaktivverdünners, da dieser für die Einstellung der rheologischen Eigenschaften maßgebend ist. Während der Filmbildung verliert der Reaktivverdünner seinen Charakter als Lösemittel und wird durch chemische Reaktion Bestandteil des Bindemittels. Die Pigmente dienen der Festlegung der später gewünschten Farbe und stellen damit den optisch auffälligsten Bestandteil dar. Bei der Auswahl der Pigmente ist darauf zu achten, dass diese im UV-Spektralbereich möglichst transparent sind, damit das einwirkende UV-Licht auch in tiefer liegende Schichten der Applikation eindringen und die dort vorliegenden Photoinitiatoren erreichen kann. Diese absorbieren die eingebrachte UV-Strahlung und setzen reaktive Radikale frei, die dann die radikalische Polymerisation starten [Brock 2012, Pieke 2009, Teschner 1991, Turner 1998].

2.4 Oberflächeneigenschaften

Der Bedruckstoff Metall verfügt nicht über die für Papier typische Kapillarsaugfähigkeit, in welche die Farbe in das Gefüge eindringen könnte [Martorana 2010]. Ein wesentlicher Faktor zur Haftung von Farben und Lacken auf Metall stellt daher die Adhäsion dar. Diese wird von molekularen Wechselwirkungen, Wasserstoffbrücken oder Van-der-Waals-Kräften an den Grenz- und Oberflächen der Stoffpaarung bestimmt [Zimmermann 2010]. Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit den Zusammenhängen der Adhäsion respektive der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten auf Festkörpern, dem Benetzungsverhalten und Grundlagen zum Kontaktwinkel. Im weiteren Verlauf wird ein Überblick über Methoden zur Beeinflussung der Oberflächenenergie gegeben, wodurch eine verbesserte Adhäsion von Lacken auf dem Substrat erzielt werden kann.

2.4.1 Oberflächenenergie und Benetzung

Unter Adhäsion wird im Allgemeinen die Anhangskraft eines Körpers an einen weiteren verstanden [Techner 1991]. Zudem spielen die nach innen gerichteten Kohäsionskräfte (Zusammenhangskraft eines Körpers) eine wichtige Rolle, welche im Falle eines flüssigen Mediums immer danach streben, eine möglichst kleine Oberfläche (Tropfenbildung) anzunehmen. Bildet das flüssige Medium nun mit einem festen Körper eine gemeinsame Grenzfläche, wirken zusätzlich die Adhäsionskräfte. Unter der Annahme, dass das besagte flüssige Medium den Festkörper vollständig benetzt, dominieren die Adhäsionskräfte zwischen Flüssigkeit und Festkörper gegenüber den Kohäsionskräften der Flüssigkeit. Dieser Vorgang geht mit einer Vergrößerung der Flüssigkeitsoberfläche einher. Zur Vergrößerung der Flüssigkeitsoberfläche um ΔA , muss eine proportionale Arbeit ΔW verrichtet werden, welche durch den Proportionalitätsfaktor σ mit

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad (2-5)$$

beschrieben ist. Dieser entspricht der spezifischen Oberflächenenergie (in N/m) [Bischof 1989, Dutschk 2002, Griesheimer 2012, Zimmermann 2010].

Wie bereits erwähnt, wird unter Benetzung der Zusammenhang verstanden, wie sich eine Flüssigkeit an seinen Grenzflächen verhält, wenn diese mit einem Festkörper in Berührung steht. Ausgangspunkt der Betrachtung zur Benetzung ist die Dreiphasengrenze zwischen dem Festkörper, der Flüssigkeit und der umgebenden Gasphase. An diesem Punkt wird als Maß zur Quantifizierung der Benetzungseigenschaft der Kontaktwinkel θ herangezogen, welcher erstmals von Young 1805 beschrieben wurde. Der Kontaktwinkel ist der Winkel, welcher an der Dreiphasengrenze eine Tangente mit der Basislinie des Festkörpers bildet (siehe Abbildung 2-21) [Kamps 2012, Mischke 2007, Zimmerman 2010]:

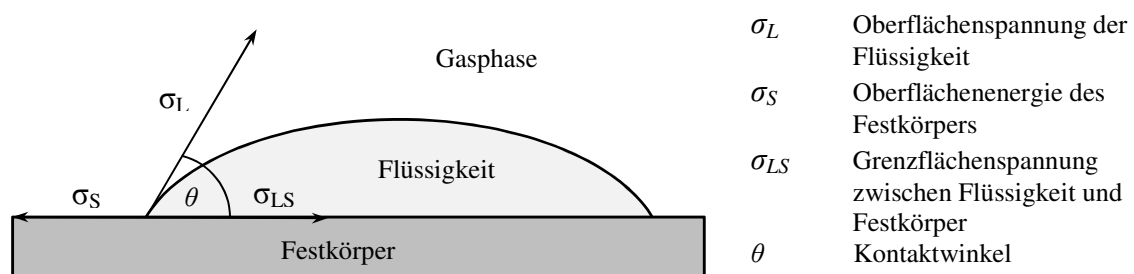


Abbildung 2-21: Veranschaulichung der Young'schen-Gleichung zum Kontaktwinkel nach [Young 1805]

Die an den Grenzflächen beteiligten Kräfte sind die Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_L , die Oberflächenenergie des Festkörpers σ_S sowie die Grenzflächenspannung zwischen der Flüssigkeit und dem Festkörper σ_{LS} , aus denen sich der Kontaktwinkel wie folgt berechnen lässt [Griesheimer 2012, Mock 2004, Young 1805]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \quad (2-6)$$

Anhand des Kontaktwinkels lassen sich zudem verschiedene Benetzungszustände klassifizieren, welche Auskunft darüber geben, in welcher Form eine Flüssigkeit auf einem Festkörper spreadet. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 2-22 schematisch dargestellt:

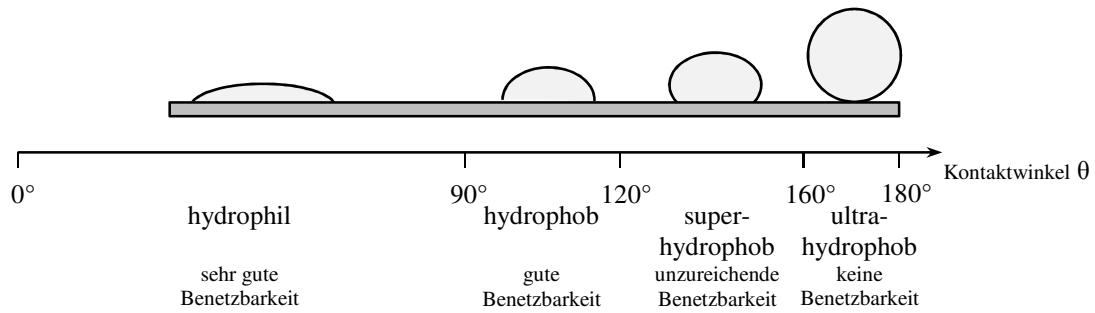


Abbildung 2-22: Einteilung der Benetzungszustände in Abhängigkeit des Kontaktwinkels θ nach [Zimmermann 2010, Griesheimer 2013]

Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_L und die freie Oberflächenenergie des Festkörpers σ_S sind nach Schultz (1977) zudem jeweils die Summe ihrer polaren σ_i^p und dispersen Anteile σ_i^d . Der polare Anteil ist als die Wechselwirkung permanenter Dipole zu verstehen, während der disperse Anteil die Wechselwirkung induzierter Dipole darstellt. Nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK) agieren in Form von Wechselwirkungen entlang der Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Festkörper jeweils und lediglich nur die polaren Anteile sowie die dispersen Anteile beider Phasen miteinander [Griesheimer 2012, Herold 2001, Kinloch 1987, Mock 2004, Schultz 1977]:

σ_S^p	Polarer Anteil der Oberflächenenergie des Festkörpers	σ_L^p	Polarer Anteil der Oberflächenspannung der Flüssigkeit
σ_S^d	Disperser Anteil der Oberflächenenergie des Festkörpers	σ_L^d	Polarer Anteil der Oberflächenspannung der Flüssigkeit

$$\sigma_S = \sigma_S^p + \sigma_S^d \quad \text{und} \quad \sigma_L = \sigma_L^p + \sigma_L^d \quad (2-7)$$

Ferner ergibt sich die Grenzflächenspannung nach OWRK:

$$\sigma_{LS} = \sigma_S + \sigma_L - 2 \cdot \left(\sqrt{\sigma_S^p \cdot \sigma_L^p} + \sqrt{\sigma_S^d \cdot \sigma_L^d} \right) \quad (2-8)$$

Sowie die Eliminierung der Oberflächenspannung des Festkörpers:

$$\sigma_L \cdot (\cos \theta + 1) = 2 \cdot \left(\sqrt{\sigma_S^p \cdot \sigma_L^p} + \sqrt{\sigma_S^d \cdot \sigma_L^d} \right) \quad (2-9)$$

2.4.2 Verfahren zur Oberflächenbehandlung

Es ist möglich, mittels einer ganzen Reihe von Oberflächenvorbehandlungsverfahren auf die Benetzbarkeit von Festkörpern positiven Einfluss zu nehmen. In der nachfolgenden Abbildung 2-23 sind verschiedene Verfahren zur Behandlung von Oberflächen im Überblick aufgeführt:

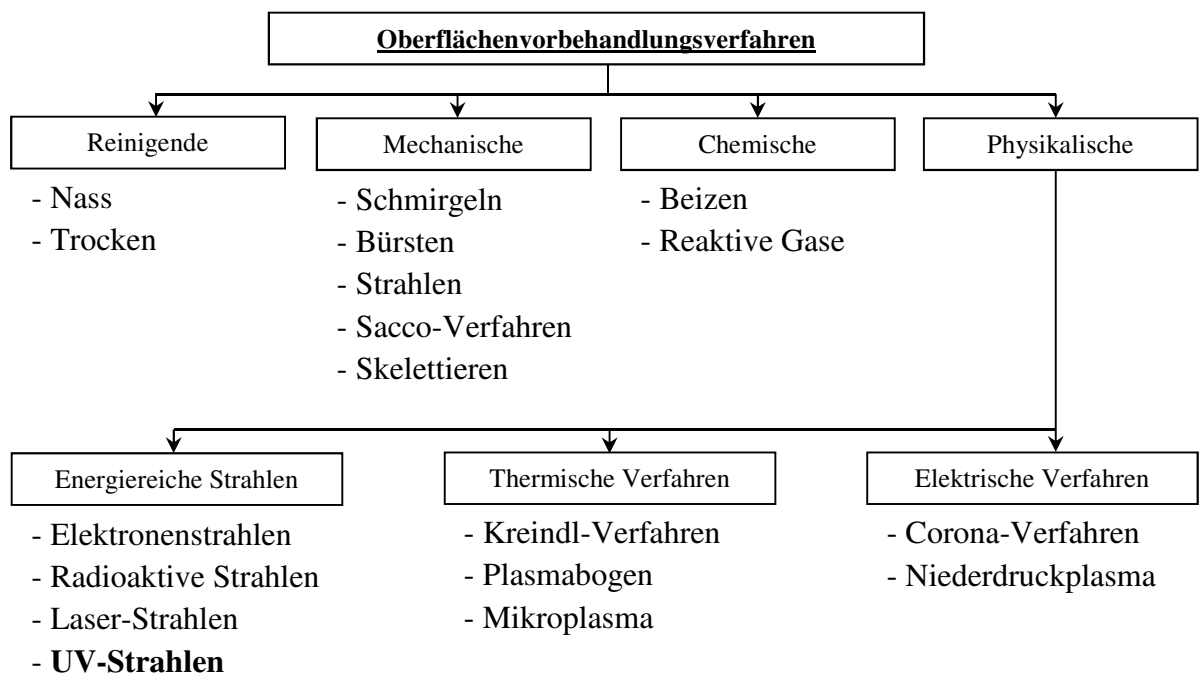


Abbildung 2-23: Überblick zu verschiedenen Oberflächenvorbehandlungsverfahren nach [Gleich 2004, Rasche 1988]

Die Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung sollen an dieser Stelle lediglich benannt und in dem vorhergehenden Schaubild klassifiziert werden, da eine Erläuterung eines jedes Verfahrens zu weit führen würde. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Vorbehandlung mittels UV-Strahlen von Bedeutung werden und ist daher hervorgehoben dargestellt.

2.5 Produktionslinien und Linienkonfigurationen

Zum Druck der Lacke und des Druckbildes kommen verschiedene Druck- und Lackiermaschinen zum Einsatz, die immer innerhalb einer Produktionslinie angeordnet sind. Produktionslinien unterscheiden sich wie folgt:

- Lackierlinie : Einseitige Lackierung der Tafeln
- Drucklinie : Einseitiger Druck der Tafeln
- Druck- und Lackierlinie : Einseitiger Druck mit anschließendem Schutzlackauftrag

Eine Druck-/ Lackierlinie setzt sich grundsätzlich aus verschiedenen Anlagen mit der typischen Prozessfolge zusammen:

- Vereinzelung des Materials (Anleger)
- Transport des Materials (Vakuumbänder, Transportriemen oder Greifertraversen)
- Druck der Farbe oder des Lacks (Lackmaschine, Druckmaschine)
- Trocknung/ Härtung (Trockner, Strahler)
- Stapelung des Materials (Stapelbox).

2.5.1 Lackierlinien

Die in der Praxis verwendeten Lackierlinien bestehen aus den Hauptkomponenten Anleger, Lackiermaschine, Trockner und Stapelung. Abbildung 2-24 zeigt die typische Anordnung einer Lackierlinie. Mit dieser Lackierlinienkonfiguration sind die Prozesse Innenlackierung, Außenlackierung und Auftrag der Schutzlackierung mit thermischer Trocknung möglich. Der Tafeltransport erfolgt plan, d. h. in einem horizontalen Transport vom Anleger zur Stapelung.

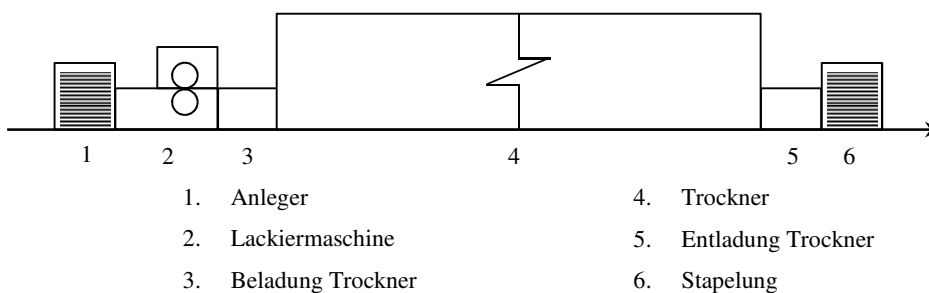


Abbildung 2-24: Lackierlinie mit thermischen Trockner nach [KBA 2012]

Mit dieser Lackierlinie kann die Tafel einseitig lackiert werden. Für eine beidseitige Lackierung (Innen- und Außenlack) sind zwei Durchläufe erforderlich.

Die Abbildung 2-25 zeigt eine schematische Darstellung eines typischen Lackierwerks einer Lackiermaschine. Dabei handelt es sich um ein Walzenlackierwerk mit drei Lackwerkwalzen.

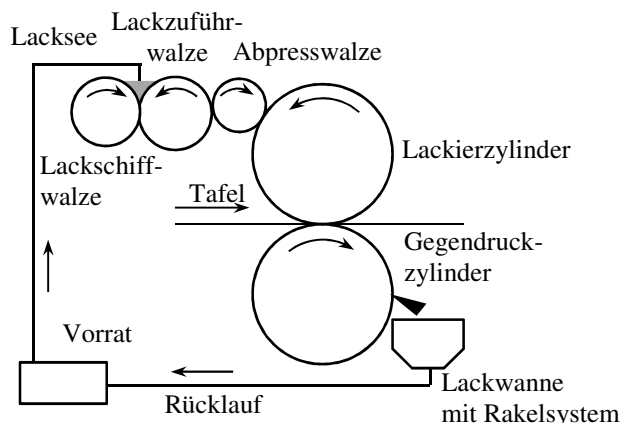


Abbildung 2-25: Schematische Darstellung eines Walzenlackierwerks einer Lackiermaschine nach [KBA 2016a]

Im Walzenspalt zwischen Lackschiffwalze und Lackzuführwalze liegt ein Lacksee vor. Mittels Abstand zwischen der Abpresswalze zu der Lackschiffwalze wird die Dosierung der Lackmenge vorgenommen. Der eingefärbte Lackierzylinder überträgt den Lack auf die Tafel. An den formatüberstehenden Bereichen (Druckbereich außerhalb des Tafelformates) wird der Lack auf den Gegendruckzylinder übertragen. Um eine rückseitige Lackierung der Tafel zu vermeiden, wird der auf dem Gegendruckzylinder vorliegende Lack mittels Rakel abgestreift, in einem Reservoir aufgefangen und zur Dosierung zurückgepumpt.

Nach erfolgter Lackierung werden die Tafeln dem Trockner zugeführt (siehe Abbildung 2-24). Hierbei werden die plan liegenden Tafeln in der Beladung des Trockners durch von unten her kommende Drahtrahmen aufgerichtet und senkrecht durch den Trockner geführt. Durch den senkrechten Transport wird die Transportzeit der Tafeln durch den Trockner verlängert und die Wirkzeit der Trocknung erhöht. Die Besonderheit der Lackierlinie stellt die durch den Tafeltransport bedingte Wendung der lackierten Tafeln dar. Analog zur Förderbandtechnik kippen die Tafeln in Laufrichtung über. Präzise ausgedrückt, handelt es sich hierbei um ein Umstülpen, da die Tafeln über die Kopfseite umschlagen werden. Durch dieses Verfahren findet bei jedem Trocknerdurchlauf eine Umstülpfung der Tafeln statt.

Als weitere Linienkonfiguration ist eine sogenannte Tandem-Lackierlinie möglich. Bei dieser Anordnung ist eine zweite Lackiermaschine inklusive Trockner nach der Entladung des ersten Trockners konfiguriert. Durch die transportbedingte Wendung im Trockner werden die Tafeln

mit der nichtlackierten Seite der zweiten Lackiermaschine zugeführt. Mit Tandem-Lackierlinien können innerhalb eines Liniendurchlaufes beide Seiten (d. h. Innen- und Außenlack) der Tafel lackiert werden.

2.5.2 Druckmaschinen und Drucklinien

Innerhalb der Drucklinien sind Druckmaschinen angeordnet, bei welchen üblicherweise das Offsetdruckverfahren zur Bedruckung der Tafeln zum Einsatz kommt. Dabei werden die druckenden und nichtdruckenden Bildstellen durch hydrophobe und hydrophile Eigenschaften der Druckplatten definiert. Die verwendeten Farben werden physikalisch durch Verdunstung des beigesetzten Lösemittels in einem der Druckeinheit nachgelagerten Trockner getrocknet. Auch hier findet durch den Trocknerdurchlauf ein Umstülpen der Tafeln statt.

Die innerhalb der Drucklinien angeordneten Druckmaschinen unterscheiden sich in der Ausführung des sogenannten Unterbaus, also den Baugruppen die für den Tafeltransport vorgesehen sind. Die Druckmaschinen können unterschieden werden in:

- Druckmaschinen mit planem Tafeltransport und
- Druckmaschinen mit rotativem Tafeltransport (Greiferschluss).

Bei Druckmaschinen mit planem Transport werden die Tafeln über Vakuumbänder oder Transportriemen durch die Druckmaschine bewegt. Dies hat zum einem zur Folge, dass die Tafeln vor jedem Druckwerk der Druckmaschine auf einem separatem Anlegertisch neu ausgerichtet werden müssen (siehe Abbildung 2-26, Punkt 2), wodurch die Produktionsgeschwindigkeit jedoch limitiert wird. Zum anderem ist es dadurch möglich, sehr steifes und dickes Tafelmaterial zu verdrucken, da die Tafeln während des Druckliniendurchlaufes nicht gebogen werden.

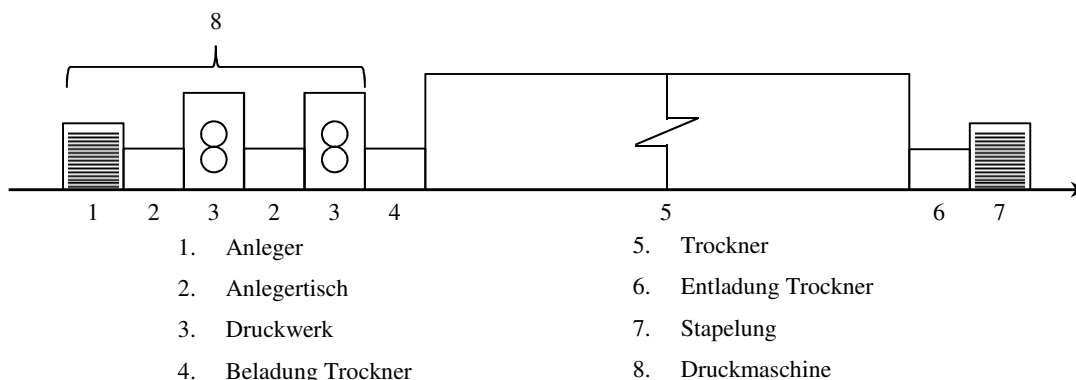


Abbildung 2-26: Beispiel einer 2-Farben Druckmaschine innerhalb einer Drucklinie mit thermischen Trockner nach [KBA 2012]

Die zweite Ausführung von Druckmaschinen orientiert sich stärker an Druckmaschinen des Bogenoffsetdrucks. Wichtigstes Merkmal hierfür ist der Tafeltransport mittels Greiferschluss und Übergabetrommeln. Die Tafeln werden am Anlegerstapel vereinzelt und in einem Schuppenstrom der Druckmaschine vor dem ersten Druckwerk zugeführt und ausgerichtet. Die in den Vorder- und Seitenmarken des Anlegertisches ausgerichtete Tafel wird dann von einem Greifersystem erfasst und mittels weiterer Greifersysteme der Gegendruckzylinder und Übergabetrommeln in einem Greiferschluss durch die Druckmaschine befördert. Diese Ausführung des Unterbaus hat zur Folge, dass die Tafeln in Breitbahn gebogen werden, wodurch die Tafeln eine gewisse Flexibilität aufweisen müssen, da die Tafeln sonst mit der Hinterkante an anderen Baugruppen der Druckmaschine kollidieren könnten. Der Greiferschluss erlaubt hingegen höhere Produktionsgeschwindigkeiten, da die Tafeln nicht innerhalb der Druckmaschine erneut ausgerichtet werden müssen.

Es existieren verschiedene Ausführungsvarianten von Drucklinien, bei denen die der Druckmaschine nachgelagerten Baugruppen wie folgt konfiguriert sein können:

Variante 1 – Trockner:

Planliegender Weitertransport der bedruckten Tafeln über Transportriemen oder Vakuumbänder zu einem Trockner.

Variante 2 – UV-Härtung:

Planliegender Weitertransport der bedruckten Tafeln über Transportriemen oder Vakuumbänder durch eine UV-Strahlungseinrichtung.

Variante 3 – UV-Härtung mit nachgelagerter Schutzlackierung (UV oder thermisch):

Planliegender Weitertransport der bedruckten Tafeln über Transportriemen oder Vakuumbänder durch eine UV-Strahlungseinrichtung. Anschließender Weitertransport über Transportriemen oder Vakuumbänder zu einer Lackiermaschine mit einer ebenfalls nachgelagerten UV-Strahlungseinrichtung oder einem Trocknungssofen.

Die nachfolgende Abbildung 2-27 zeigt eine schematische Beispielanordnung einer UV-Druck- und Lackierlinie mit einer integrierten Druckmaschine, welche mit Übergabetrommeln für den rotativen Tafeltransport ausgestattet ist, sowie einer integrierten Lackiermaschine für UV-Systeme.

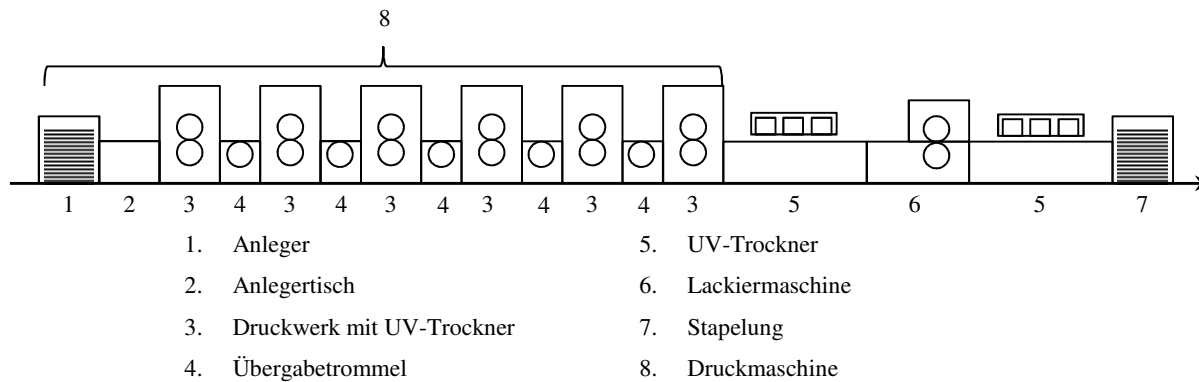


Abbildung 2-27: Beispiel einer 6-Farben Druckmaschine innerhalb einer UV-Druck- und Lackierlinie mit integrierter UV-Lackiermaschine nach [KBA 2012]

Bei einer Auswertung von Verkaufsdaten der Fa. Koenig & Bauer-MetalPrint GmbH von Druckmaschinen konnten Rückschlüsse auf die Konfiguration der Druckmaschinen gezogen werden. Dabei werden die Druckwerke gezählt, mit welchen die jeweiligen Druckmaschinen bestellt werden. Knapp die Hälfte der installierten Basis sind 6-Farben Druckmaschinen, während weitere 25 % 4-Farben Druckmaschinen darstellen.

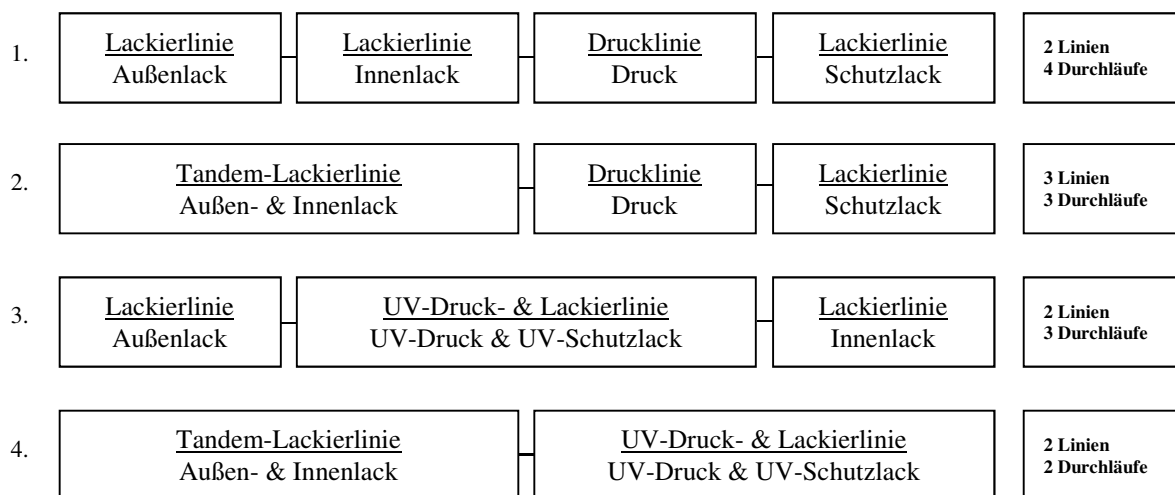
Tabelle 2-9: Prozentuale Verteilung von im Feld befindlichen Druckmaschinen nach Anzahl der Druckwerke [KBA 2016b]

Anzahl der Druckwerke	2	3	4	5	6	7	8
Prozentuale Verteilung	5,4 %	1,4 %	24,3 %	5,4 %	48,6 %	2,7 %	12,2 %

2.5.3 Linienkonfigurationen

Mithilfe der Beschreibung der einzelnen Druck- und Lackierlinien sowie mit dem vorgestellten Aufbau der Druck- und Lackschichten auf dem Rumpfblech ist es nun möglich, die beteiligten Prozesse in ihren Kombinationsmöglichkeiten zu ordnen. Eine Linienkonfiguration beschreibt in diesem Falle eine Abfolge von Lackier- und Drucklinienprozessen, mit der eine vollständig bedruckte und lackierte Tafel hergestellt werden kann.

Das Ziel einer sinnvollen Linienkonfiguration besteht darin, möglichst wenige Durchläufe der beteiligten Druck- und Lackierlinien für die notwendigen Schichten aufzuwenden. In der Abbildung 2-28 sind exemplarisch 4 mögliche Linienkonfigurationen dargestellt.



Auszug; weitere Linienkonfigurationen möglich

Jedes Kästchen stellt eine Produktionslinie dar, wobei Lackierlinien sowohl für Innen-, Außen- und Schutzlack gerüstet werden können.

Abbildung 2-28: Schematische Darstellung verschiedener Linienkonfigurationen; 1. Mit zwei verschiedenen Produktionslinien (Lackierlinie und Drucklinie) und vier Durchläufen der Tafeln; 2. Mit drei verschiedenen Produktionslinien (Tandem-Lackierlinie, Lackierlinie und Drucklinie) und drei Durchläufen der Tafeln; 3. Mit zwei verschiedenen Produktionslinien (Lackierlinie und UV-Druck- und Lackierlinie) und drei Durchläufen der Tafeln. 4. Mit zwei Produktionslinien (Tandem-Lackierlinie und UV-Druck- und Lackierlinie) und zwei Durchläufen der Tafeln [eigene Darstellung]

In den Linienkonfigurationen 1. und 2. wird der Außenlack vor dem Innenlack aufgetragen. Aufgrund der innerhalb des Trocknerdurchlaufes enthaltenen Umstülpungen werden separate Stapelwendungen vermieden und das Weißblech liegt für den jeweiligen Folgeprozess mit der notwendigen Seite nach oben. In der 3. Linienkonfiguration sind die separaten Wendungen mittels Stapelwender jeweils nach jedem Durchlauf erforderlich. Bei der 4. Linienkonfiguration ist eine Tandem-Lackierlinie mit einer UV-Druck- und Lackierlinie kombiniert, wodurch die geringste Anzahl an Durchläufen erzielt wird.

Als Faustregel kann gesagt werden, dass für jeden Durchlauf ca. ein Tag aufgewendet wird. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Produktionsdurchläufe 24 Stunden benötigen. Vielmehr werden verschiedene Aufträge in der Regel blockweise produziert und auf Pufferflächen für den Folgeprozess zwischengelagert, um am Folgetag weiterbearbeitet zu werden.

2.5.4 (Patent-)Ansätze für Produktionslinien

Mit Blick auf die relativ aufwendigen Prozessabfolgen an den zuvor genannten Beispielen wird deutlich, dass es wirtschaftlich interessant sein könnte, Prozessschritte verschiedener Liniendurchläufe zusammenzufassen, um dadurch die Herstellkosten zu senken und Metallverpackungen gegenüber anderen Verpackungsmaterialien wie z. B. Kunststoff oder Glas wettbewerbsfähiger zu produzieren.

Einen ersten, bislang nicht realisierten Vorschlag bietet McHugh im Patent EP1503899. Er verfolgt den Ansatz, die Druckbildseite der Tafel in einem Greiferschluss mit Außen- und Schutzlack sowie dem Druck zu versehen. Der Tafeltransport innerhalb der Druckmaschine ist dadurch durchgehend rotativ gestaltet [McHugh 2005].

Im Patent EP1503899 von McHugh wird eine Produktionslinie beschrieben, die in der nachfolgenden Abbildung 2-29 schematisch dargestellt ist.

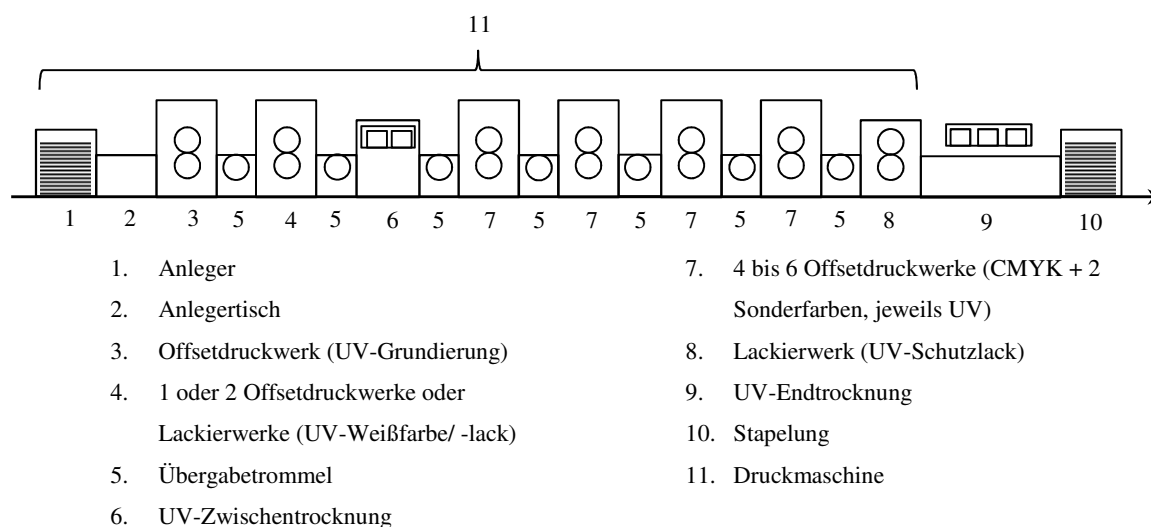


Abbildung 2-29: Vorschlag einer Produktionslinie nach [McHugh 2005]

McHugh beschreibt, dass das Weißblech mit einer UV-trocknenden Grundierung im ersten Druckwerk zu versehen ist. Diese soll als eine Art Haftvermittler mit Schichtdicken von 1,5 – 3,0 μm ausgeprägt sein [McHugh 2005]. Um welche Art der Grundierung es sich dabei handeln soll und welche Anforderungen an diese gestellt werden, wird nicht näher beschrieben. Auf der Grundierungsschicht sollten nach McHugh ein oder zwei Aufträge Weißdruckschichten mit UV-Zwischentrocknern aufgetragen werden. McHugh begründet den

Sachverhalt damit, dass eine Vielzahl dünnerer Weißdruckschichten bis zur Erreichung des gewünschten Weißgrades die Durchtrocknung begünstigen und die UV-Strahlung effektiver in dünnere Schichten einwirken könne [McHugh 2005]. Der von McHugh abschließend beschriebene Mehrfarbendruck sowie der Schutzlackauftrag entsprechen dem heutigen Stand der Technik und finden in der Praxis bereits Anwendung. Die von McHugh beschriebene Produktionslinie hat in der Praxis bislang aber keine Anwendung gefunden.

Der Aspekt, Weißdruckschichten in einer Mehrzahl dünner Schichten aufzutragen, wurde von McHugh richtig erkannt, weil eine deckende Pigmentierung generell problematisch ist, da in stärkerem Maße lichtstreuende und bei entsprechender Farbe, in diesem Fall „Weiß“, auch UV-Licht-reflektierende Pigmente benutzt werden müssen, die das UV-Licht nicht in die unteren Schichten vordringen lassen. Dort kann deswegen keine ausreichende Vernetzung eintreten [Brock et al. 2012]. In diesem Fall wäre die Oberfläche gehärtet, die zum Substrat hingewandten Photoinitiatoren jedoch nicht aktiviert. Bei einer weiteren Belastung, z. B. durch späteres Tiefziehen, würden durch die mangelnde Härtung dieser Moleküle die Schichten auf dem Weißblech verrutschen.

Die Haftung eines auf UV-Basis härtenden Lackes auf dem Weißblech war bereits Gegenstand mehrerer Untersuchungen. So untersuchte Fragni Faktoren zur Verbesserung der Haftung von kationisch UV-härtenden Beschichtungen auf Weißblech sowie die Zusammensetzung des Passivierungsfilms auf dem Substrat [Fragni et al. 2006]. Weiterhin führte Barilli eine Untersuchung hinsichtlich der Adhäsion von verschiedenen Arten von Lacken, wie sie auf Lebensmittelverpackungen verwendet werden, durch [Barilli et al. 2003]. Dabei gelangte er zu folgenden Ergebnissen:

- Organosol- und Epoxyphenol-Lacke weisen eine gute Trocknung und Nasshaftung, sowohl vor als auch nach der Sterilisation durch Wärmebehandlung und auch hohe Impedanzwerte auf.
- Die Trockenhaftung der UV-Lacke erwies sich als zufriedenstellend auf alle berücksichtigten Proben.
- Die Nasshaftung von UV-Lacken hängt in erster Linie von den Eigenschaften des Lackes ab und, in geringerem Maße, von der Oberfläche des Weißblechtyps, insbesondere der Passivierung. Um eine ausreichende Haftung zu erreichen, wird ein Backvorgang durchgeführt. [Barilli et al. 2003]

Ein weiterer Vorschlag zur Produktionslinie offenbart die Patentanmeldung EP2428359A1 von Ludin und Wagner. In dem Patent wird beschrieben, wie eine UV- Druckmaschine innerhalb einer UV-Druck- und Lackierlinie so eingestellt werden kann, dass damit sowohl der Auftrag des Außenlacks, des Drucks und des Schutzlacks unter Verwendung von UV-Systemen innerhalb eines Liniendurchlaufes möglich werden. Dabei soll vor dem ersten Druckwerk eine elektromagnetische Bestrahlungseinrichtung aktiviert sein, welche als langgestreckte UV-Gasentladungsröhre oder langgestreckter Infrarotstrahler ausgeprägt sind. Ziel dabei soll eine haftungsbegünstigende Erhöhung der Oberflächenenergie des Substrates sein [Ludin 2012].

Die nachfolgende Abbildung 2-30 zeigt die schematische Produktionslinie nach Ludin und Wagner. Es ist nicht spezifiziert, in welcher Form der Tafeltransport innerhalb der Druckmaschine ausgeführt ist.

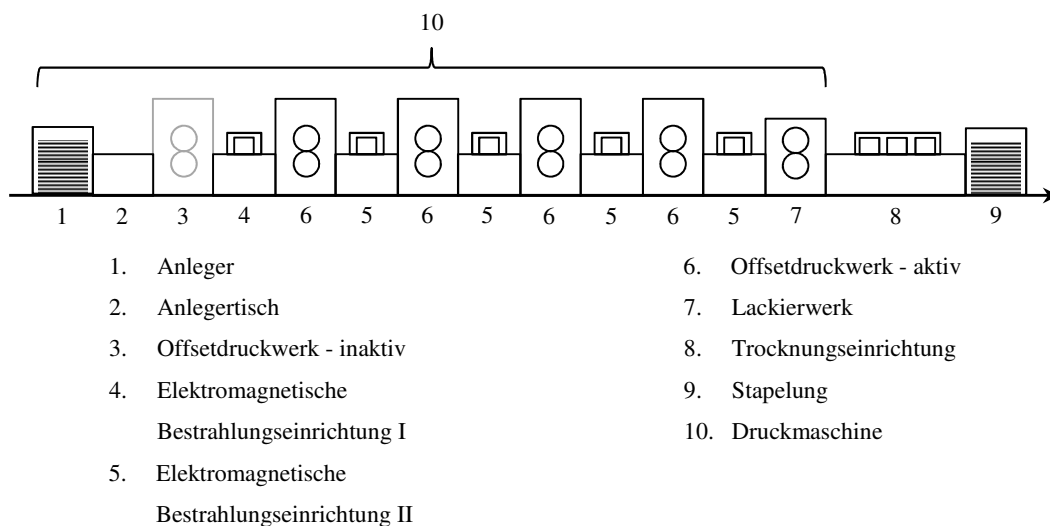


Abbildung 2-30: Vorschlag einer Produktionslinie nach [Ludin 2012]

Ludin und Wagner stützen die Produktionslinie auf eine typische UV-Druck- und Lackierlinie. Die dabei integrierte Druckmaschine wird derart eingestellt, dass das erste Druckwerk (3) inaktiv, die zugehörige, nachgelagerte (UV-)Strahlungseinrichtung (4) aber aktiv geschaltet wird. Alle folgenden Druckwerke (6) sind aktiv geschaltet. Dadurch soll das Weißblech mittels der ersten Bestrahlungseinrichtung für den Druckprozess vorbehandelt und ein Druck des UV-Lacks direkt auf das Weißblech realisiert werden. Mit dieser Produktionslinie werden in der Praxis bereits Produktionen durchgeführt.

3. Zielsetzung und Vorgehensweise

Um das Weißblech für Metallverpackungen mit den erforderlichen Schichten (Innenlack, Außenlack, Druck und Schutzlack) zu bedrucken, werden verschiedene Produktionslinien eingesetzt (siehe Abschnitt 2.5). Jedoch ergeben sich, aufgrund der in der Praxis verfügbaren Linienkonfigurationen, häufige Durchläufe der Tafeln bis alle Schichten aufgetragen sind (siehe Abbildung 2-28). McHugh und Ludin beschreiben in ihren Patentansätzen, durch den Einsatz von UV-Farbsystemen als Ersatz für thermisch trocknenden Außenlack, eine Verdichtung der Linienkonfiguration, bei der der Außenlack in einem Durchlauf mit dem Druck und dem Schutzlack aufgetragen wird. Das Ziel dieser Arbeit ist es, aufbauend auf den theoretischen Arbeiten von McHugh und Ludin, Linienkonzepte zu entwerfen, welche die Durchläufe der Tafeln reduzieren. Dabei soll ebenfalls der Einsatz UV-basierter Farbsysteme verfolgt werden. Daraus lässt sich als weiteres Ziel ableiten, dass der thermisch trocknende Außenlack durch ein UV-härtendes Farbsystem zu ersetzen ist. Da der Innenlack in Kontakt mit dem Füllgut steht, und die in der UV-Farbe enthaltenen Photoinitiatoren über ein erhöhtes Migrationspotenzial verfügen [Huber o. J.], bleibt dieser von einer Überführung zu UV-Systemen ausgeschlossen und ist nicht integraler Bestandteil der Zielsetzung. Um einer derartigen Linienkonfiguration Rechnung tragen zu können, sollen im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen zur Haftung von UV-Farben auf Weißblechen durchgeführt werden, um damit Rückschlüsse auf konzeptionelle Folgerungen ziehen zu können.

Zur Erreichung einer ausreichenden Haftung von UV-Farbsystemen auf Weißblech werden zudem Untersuchungen zur Vorbehandlung von Weißblechen durchgeführt. Das präferierte Vorbehandlungsverfahren ist die Vorbehandlung mittels UV-Strahlen. Daher ist eine weitere wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit die Untersuchung von UV-Vorbehandlungsverfahren bis hin zum Verständnisgewinn zu den photochemischen Wirkmechanismen von UV-Strahlen auf Weißblech.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es notwendig, auch die Weiterverarbeitungsprozesse von Metallverpackungen im Hinblick auf die Haftung von UV-Farbsystemen zu berücksichtigen, da diese Prozesse die aufgetragenen Schichten besonderen Belastungen, wie zum Beispiel Umformungsbeanspruchungen, unterwerfen. Es existiert bereits eine Vielzahl an Normen (siehe Tabelle 2-3) zur Prüfung von Weißblechen bei Umformung oder anderen Beanspruchungen. Jedoch besteht bislang kein kausaler Zusammenhang zwischen den

Prüfmethoden und der endgültigen Metallverpackung unter Berücksichtigung der erforderlichen Weiterverarbeitungsprozesse. Als weiteres Ziel dieser Arbeit soll daher eine Systematik erarbeitet werden, welche die Prüfmethoden mit den Weiterverarbeitungsprozessen und den Metallverpackungen (Produkten) in Einklang bringt.

Die weitere Vorgehensweise ist in den Kapiteln 4 bis 7 wie folgt strukturiert: Im folgenden Kapitel 4 werden die Analyse- und Charakterisierungsmethoden, welche während der Versuche Anwendung finden, näher beschrieben. Davon ausgeschlossen sind die eingesetzten Verfahren zur Vorbehandlung der Weißbleche. Diese werden jeweils im entsprechenden Abschnitt von Kapitel 5 erläutert.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche ausführlich dargestellt. Die daraus resultierenden Diskussionen der vorgestellten Ergebnisse sowie ein Abgleich mit der verfügbaren Literatur wird in Kapitel 6 durchgeführt. Aufgrund der zuvor beschriebenen Zielsetzungen gliedert sich Kapitel 6 in drei Teilbereiche:

- Einfluss der eingesetzten Materialien
- Prüfmethoden zur Umformung
- Wirkmechanismen einer UV-Vorbehandlung

Abschließend werden die aus der Arbeit gewonnenen Rückschlüsse auf mögliche konzeptionelle Folgerungen in Kapitel 7 behandelt, um dem Kernziel (Entwurf eines Linienkonzpts zur Reduzierung der Liniendurchläufe) dieser Arbeit Rechnung zu tragen.

4. Analyse- und Charakterisierungsmethoden

In diesem Kapitel wird auf die in den Versuchen angewandte Mess- und Prüfmethodik eingegangen. Diese werden unterschieden in Analysemethoden zur Haftung und Benetzung der Beschichtung auf den Weißblechproben, eine XPS-Analyse zur Untersuchung der Reinigungswirkung der Excimer-Vorbehandlung und Methoden zur Charakterisierung der Umformbarkeit beschichteter Weißblechproben. Die in den Versuchen ermittelten Ergebnisse werden in Kapitel 5 vorgestellt.

4.1 Analysemethoden zur Charakterisierung der Benetzung und Haftung

Das zentrale Merkmal hinsichtlich der Farbentwicklung stellt die Charakterisierung der Benetzung und der Haftung einer Beschichtung auf dem Weißblech dar. Hierfür werden zwei Methoden angewendet: Zum einen die Kontaktwinkelmessung, welche Aufschluss über die Benetzungsfähigkeit gibt, um die Farbe-Weißblech-Vorbehandlungs-Kombination charakterisieren zu können. Zum anderen der Gitterschnitttest, erweitert mit dem Tesa-Test (auch als Scotch-Test bezeichnet). Letztere wird als die wesentliche Charakterisierung zur Bestimmung der Haftung angesehen. Die Bewertungen des Gitterschnitttests in Verbindung mit dem Tesa-Test erfolgen nach DIN EN ISO 2409.

4.1.1 Kontaktwinkelmessung

Zur Ermittlung der Benetzungseigenschaften der Weißblechproben kommt für die Voruntersuchungen das PGX+ Pocket Goniometer der Fa. Fibro zum Einsatz. Bei den Untersuchungen der Vorbehandlungsverfahren wurde der Mobile Surface Analyzer, kurz MSA, der Fa. Krüss verwendet. Als relevante Messgrößen werden der ausgeprägte Kontaktwinkel zwischen benetzender Flüssigkeit und Weißblechoberfläche sowie die freie Oberflächenenergie angesehen, die auf polare und disperse Wechselwirkungen sowie deren jeweiligen Grad an Veränderung nach erfolgter Vorbehandlung zurückzuführen ist.

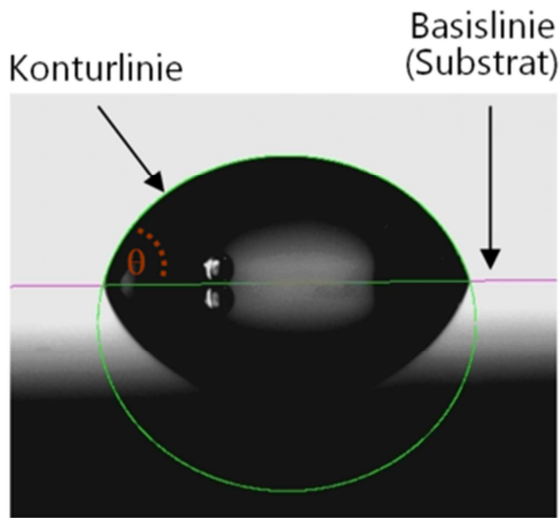


Abbildung 4-1: Tropfenkonturanalyse
[Krüss 2017]



Abbildung 4-2: Mobile Surface Analyzer (MSA)
der Fa. Krüss [Krüss 2017]

Um die Weißblechproben zu charakterisieren sowie Veränderungen in der Benetzbarkeit bedingt durch die Auswirkungen der Vorbehandlungsmethode aufzuzeigen, wird eine Messung des Kontaktwinkels mit den Referenzflüssigkeiten „demineralisiertes Wasser“ sowie Diiodmethan durchgeführt. Die Messungen zur Bewertung der Vorbehandlungsmethode erfolgen für jede der Weißblechproben sowohl vor als auch nach der durchgeführten Vorbehandlung. Der Kontaktwinkel stellt dabei eine Maßzahl für die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit dar und wird optisch mittels Tropfenkonturanalyse (Drop Shape Analysis) erfasst. Die Messung erfolgt an einem Tropfen im Ruhezustand. Die Beziehung zwischen den beiden Phasen lässt sich dabei mit Hilfe der Young'schen Gleichung beschreiben, welche den Zusammenhang zwischen dem Kontaktwinkel θ , der Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_L , der Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper σ_{LS} sowie der freien Oberflächenenergie σ_S des Festkörpers belegt. Aus den Messungen des Kontaktwinkels der Referenzflüssigkeiten erfolgt die Berechnung der freien Oberflächenenergie des Festkörpers mit Formel (2-6) nach Formel (4-1):

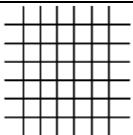
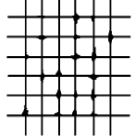
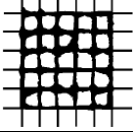
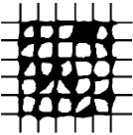
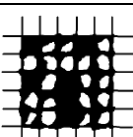
$$\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \rightarrow \sigma_S = \sigma_{LS} + \sigma_L \cos \theta \quad (4-1)$$

sowie die Zusammensetzung aus polarem und dispersem Anteil nach OWRK [KBA 2017c].

4.1.2 Gitterschnitttest

Zur Überprüfung der Haftung der Beschichtung auf den Weißblechproben wird der Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 durchgeführt. Dazu wird die Beschichtung mit einem Mehrschneidengerät manuell so eingeschnitten, dass ein Raster von je sechs Schnitten entsteht. Die Beurteilung erfolgt visuell anhand der in DIN EN ISO 2409 aufgeführten Einstufung der Gitterschnitt-Kennwerte (siehe Tabelle 4-1) [DIN 2409, KBA 2016d, KBA 2017c].

Tabelle 4-1: Einstufung der Prüfergebnisse beim Gitterschnitttest [DIN 2409]

Gitterschnitt-Kennwert	Beschreibung	Aussehen der Oberfläche im Bereich des Gitterschnittes, an der Abplatzungen aufgetreten sind*
0	Die Schnittländer sind vollkommen glatt; keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.	
1	An den Schnittpunkten der Gitterlinien sind kleine Splitter der Beschichtung abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche nicht größer als 5 % der Gitterschnittfläche.	
2	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer und/ oder an den Schnittpunkten der Gitterlinien abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 5 %, aber nicht größer als 15 % der Gitterschnittfläche.	
3	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer teilweise oder ganz in breiten Streifen abgeplatzt, und/ oder einige Quadrate sind teilweise oder ganz abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 15 %, aber nicht größer als 35 % der Gitterschnittfläche.	
4	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer in breiten Streifen abgeplatzt, und/ oder einige Quadrate sind ganz oder teilweise abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 35 %, aber nicht größer als 65 % der Gitterschnittfläche.	
5	Jedes Abplatzen, das nicht mehr als Gitterschnitt-Kennwert 4 eingestuft werden kann.	-

**Die Bilder sind Beispiele für einen Gitterschnitt innerhalb der Kennwertstufe. Die Prozentangaben beruhen auf dem durch die Bilder vermittelten visuellen Eindruck. Dieselben Prozentangaben werden mittels digitaler Bildanalyse nicht unbedingt wiedergegeben.*

4.1.3 Methode zur Prüfung der Haftung mit Tesa 4124

Zusätzlich zum Gitterschnitt werden Abziehtests mit Klebestreifen auf dem eingebrachten Gitterschnitt durchgeführt. Dazu wird ein ca. 4-5 cm langes Stück Tesastreifen auf den eingebrachten Gitterschnitt aufgeklebt, angedrückt und anschließend mit gleichmäßiger Kraft zügig abgezogen. Je nach Haftungsgrad verbleibt die Farbe auf dem Weißblech oder wird durch das Abziehen des Tesastreifens vom Weißblech abgelöst.

Der verwendete Klebestreifen ist Tesa 4124. Das Abziehen der Klebestreifen erfolgt in einem ersten Test unmittelbar nach dem Auftrag der Beschichtung, in einem weiteren Test 24 Std. nach dem Auftrag der Beschichtung. Für die Vorversuche wird hinsichtlich einer zügigen Beurteilung auf den Gitterschnitttest verzichtet und lediglich der Tesa-Test (Tesa 58244, Tesa 57401) durchgeführt.

Die verschiedenen Tests wurden wie folgt durchgeführt:

- Gitterschnitt sofort: Durchführung des Gitterschnitts mit anschließendem Tesa-Test 4124; direkt nach der Härtung (< 1 Min.).
- Gitterschnitt nach 24 Std.: Durchführung des Gitterschnitts mit anschließendem Tesa-Test 4124; 24 Std. nach der Härtung.

4.1.4 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Als Bewertungskriterium für die Trockenhaftung der aufgetragenen Beschichtung werden von ausgewählten Proben der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Versuchsreihe zu Vorbehandlungsmethoden jeweils REM-Aufnahmen angefertigt, anhand derer die Homogenität der Beschichtung visuell beurteilt wird. Zudem sollen die Aufnahmen Rückschlüsse auf die Entstehung von Spannungsrissen durch die UV-Härtung zulassen. Für die Aufnahmen werden Auflösungen in 400-facher, 1.000-facher und 3.000-facher Vergrößerung mittels Rasterelektronenmikroskop Stereoscan 360 angefertigt. Zudem werden die Aufnahmen jeweils mit Sekundärelektronenkontrast (SE) und Rückstreuelektronenkontrast (BE) aufgenommen [Emtec 2017, KBA 2017c]. Die REM-Aufnahmen werden von der Fa. EMTEC als Laborauftrag angefertigt.

Aufnahmen mit Sekundärelektronenkontrast (SE)

Aufnahmen, welche mit dem Sekundärelektronenkontrast durchgeführt werden, lassen Rückschlüsse auf die Topografie der Oberfläche zu.

Aufnahmen mit Rückstreuelektronenkontrast (BE)

Aufnahmen, welche mit dem Rückstreuelektronenkontrast durchgeführt werden, lassen Rückschlüsse auf die Materialien zu. Während schwere Elemente hell erscheinen, sind leichte Elemente dunkel zu erkennen.

4.2 XPS-Analyse: Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie

Ziel der Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie ist es, die Reinigungswirkung einer Excimer-Vorbehandlung anhand der Veränderung der Kohlenstoffverbindungen auf dem Weißblech zu untersuchen, um dadurch Rückschlüsse auf ein Wirkmodell ziehen zu können.

Die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) ist ein Messverfahren, mit dem die Elementzusammensetzung von Festkörperoberflächen bestimmt werden kann. Durch angeregte Photonen mit einer definiert monochromatischen Energie $h \cdot c$ (hier Aluminium mit 1486,69 eV), werden Rumpfelektronen mit einer kinetischen Energie E_{kin} aus den Orbitalen ihrer Atome gelöst. Durch die Differenz der Anregungsenergie der Photonen und der kinetischen Energie der herausgelösten Elektronen ergibt sich die elementspezifische Bindungsenergie E_B [Hüfner 2003, Salignue 2009]. Der Vorgang wird als Photoionisation bezeichnet und kann mit der folgenden Formel beschrieben werden:

$$E_B = h \cdot c - E_{kin} \quad (4-2)$$

Mithilfe der XPS-Analyse sollen die auf den Weißblechproben vorliegenden organischen Verunreinigungen von Kohlenstoffverbindungen erfasst werden. Dazu werden die Kohlenstoff-Peaks (C-Peaks) vor und nach der durchgeführten Vorbehandlung verglichen und ausgewertet (vgl. Abschnitt 5.5.6). Die Abbildung 4-3 zeigt exemplarisch die Messdaten einer verzinnnten Weißblechprobe (ETP).

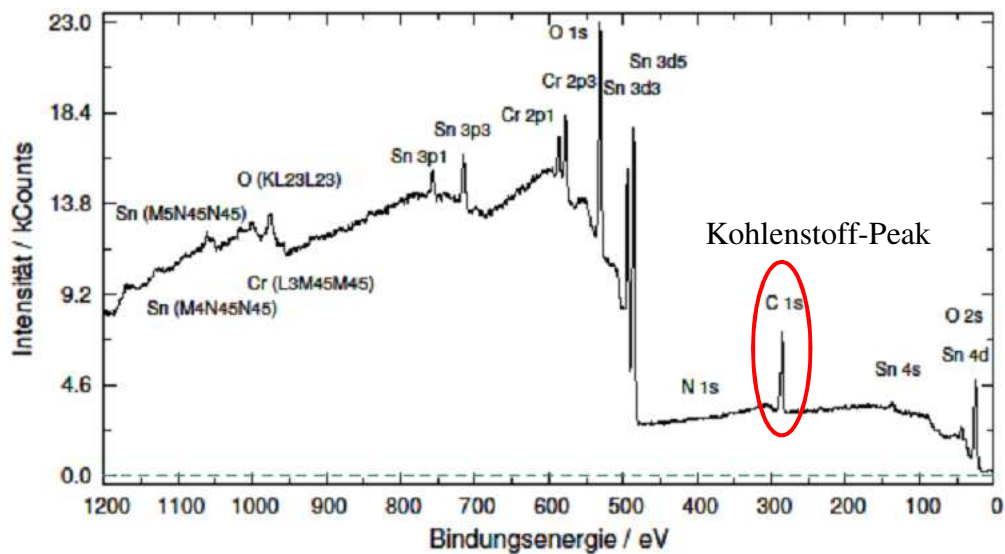


Abbildung 4-3: XPS-Spektrum einer verzinnten Weißblechprobe (ETP) mit eingezeichnetem Kohlenstoff-Peak

Das in Abbildung 4-3 dargestellte XPS-Spektrum einer verzinnten Weißblechprobe (ETP) zeigt die stoffliche Zusammensetzung der Weißblechprobe. Die Weißblechsorte ETP ist erkennbar an der Präsenz von Chrom (Cr) und Zinn (Sn). Der für die Untersuchung relevante Wert ist der markierte Kohlenstoff-Peak (C) im Bereich ~290 eV.

4.3 Methoden zur Charakterisierung der Umformbarkeit

Metallverpackungen stellen aufgrund der notwendigen Weiterverarbeitungsprozesse u. a. hohe Anforderungen an die Flexibilität der Farb- und Lackaufträge. Die häufigsten Prozesse sind Umformungen, Tiefziehungen und Stanzungen in verschiedenen Ausprägungen. Um im Blechdruck innovative Entwicklungen im Bereich der Drucktechnik oder der Farbtechnik etablieren zu können, ist es erforderlich, die entsprechenden Weiterverarbeitungsprozesse zu berücksichtigen. Dazu existieren eine ganze Reihe an Normen, welche in Abschnitt 2.1.4 bereits zusammengetragen wurden. Die genannten Normen und Prüfungen sind in der Tabelle 4-2 nochmals aufgeführt. Zusätzlich ist in Tabelle 4-2 eine Spalte enthalten, in der die in dieser Arbeit angewandten Prüfmethoden markiert sind.

Tabelle 4-2: Überblick über die vorgestellten und angewandten Prüfmethoden

Prüfmethode	Norm	Zu prüfende Anforderung	Angewandte Prüfmethode
Dornbiegeversuch – mit zylindrischem Dorn	ISO 1519	Umformung	✗
Tiefungsprüfung	ISO 1520	Umformung	✗
Zipfelprüfung an Blechen und Bändern (β2-Napf)	ISO 1669	Umformung	✓
Gitterschnitttest	ISO 2409	Haftung	✓
Schlagfalttest angelehnt an Schlagfestigkeit	ISO 6272-2	Umformung	✓
Dornbiegeversuch – mit konischem Dorn	ISO 6860	Umformung	✗
Ritzhärte-Prüfung	ISO 15184	Kratzfestigkeit	✓
T-Biegeprüfung	ISO 17132	Umformung	✗
Tiefungsversuch nach Erichsen	ISO 20482	Umformung	✓
Sterilisation	-	Sterilisationsfähigkeit	✓
Ofentauglichkeit	-	Hitzebeständigkeit	✗

Neben der Einzelprüfung wurden zudem Prüflinge mit Kombinationsprüfungen getestet, wie z. B. Sterilisation im Anschluss des Tiefungsversuches, um so weitere Praxisnähe bei den Laborversuchen zu gewinnen. Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prüfmethoden näher beschrieben.

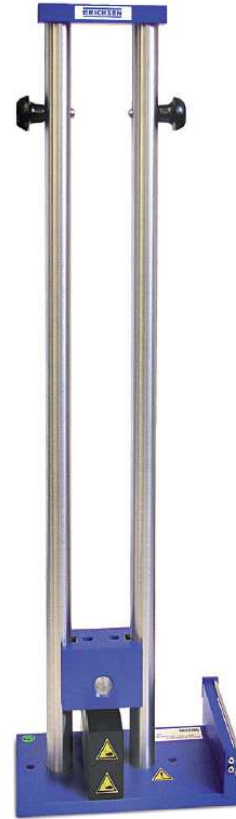
4.3.1 Schlagfalttest

Aus der Bedienungsanleitung des Schlagfalt-Prüfgeräts, Modell 471, der Fa. Erichsen:

„Durch die Schlagfaltprüfung lässt sich die Verformbarkeit beschichteter Bleche nach einer schlagartigen Biegebeanspruchung beurteilen. Dabei simuliert die Schlagfaltprüfung gängige Blechverarbeitungen, wie z. B. Stanzen, Falzen und Bördeln. Ein vorgebogenes, beschichtetes Blech wird einer definierten Schlagbeanspruchung unterworfen. Dabei erfolgt die Verformung einer zuvor zylindrischen Biegekante in eine konische. Es wird beurteilt, von welchem Biegeradius an, die Oberflächenschutzschicht Beschädigungen aufweist.

Ausführung

Das Schlagfalt-Prüfgerät, Modell 471, besteht aus einem parallel geführten Schlaghammer mit einem Gewicht von 2.300 ± 100 g und einer Fallhöhe 650 ± 5 mm. Als Auflage für das vorgebogene Probeblech dient ein speziell geformter Amboss. Zusätzlich befindet sich auf der Grundplatte ein Biegedorn mit 5 mm Ø, auf dem das Probeblech für die Schlagfaltprüfung vorgebogen wird.



**Abbildung 4-4: Schlagfalt-Prüfgerät,
Modell 471 der Fa. Erichsen
[Erichsen 1999]**

Durchführung der Prüfung

Das Probeblech wird, mit der beschichteten Oberfläche nach außen, der Länge nach um den Biegedorn U-förmig gebogen. Der Schlaghammer wird zwischen den oberen beiden Haltestiften eingehängt. Das vorgebogene Probeblech wird so auf den Amboss gelegt, dass eine der beiden Seitenkanten gegen den Anschlag stößt. Durch gleichzeitiges Entriegeln der beiden Haltestifte wird der Faltschlag ausgelöst.

Auswertung

In 1 l destilliertes Wasser werden 100 g Kupfersulfat gelöst. In dieser Lösung wird das Prüfblech 5 Minuten eingetaucht und anschließend unter fließendem Wasser gut abgespült. Die

Beschädigungen der Oberflächenbeschichtung werden entweder als Korrosionslinien oder als Korrosionspunkte sichtbar.

Als Messergebnis wird die Streckenlänge der äußeren Korrosionslinie plus Korrosionspunkte bis zum Knickpunkt der Maximalfaltung, in mm gemessen. Je kürzer die gemessene Strecke, desto besser ist die Verformbarkeit der Beschichtung.“ [Erichsen 1999]

4.3.2 Ritzhärte-Prüfung

Durch die Ritzhärte-Prüfung lässt sich die Härte einer Beschichtung durch Kratzbeanspruchungen beurteilen. Die Prüfung ist angelehnt an DIN EN ISO 15184 - Bestimmung der Härte von Beschichtungen durch Testen mit Bleistiften. Dabei simuliert die Ritzhärteprüfung mechanische Beanspruchungen von z. B. aneinander reibenden Kronkorken während des Transportes.

Durchführung der Prüfung

Die Weißblechprobe wird, mit der beschichteten Oberfläche nach außen, auf das Prüfgerät gelegt, an welchem eine Spannung anliegt. Die aufgetragene Beschichtung wirkt als Isolator und unterbricht den Stromkreis. Das Ritzelement wird mit einem Gewicht beaufschlagt. Anschließend wird das Probeblech unter dem Ritzelement hindurchgeführt. Dieser Vorgang wird mit steigendem Gewicht solange wiederholt, bis die Beschichtung durchdrungen ist und der Stromkreis geschlossen wird. Auf allen Weißblechproben wurde im Vorfeld ein Schutzlack aufgetragen [DIN 15184, KBA 2017b].

Auswertung

Es wird das Gewicht ermittelt, bei dem der Stromkreis noch nicht geschlossen ist. Als Schwellwert wird der von TK Rasselstein übliche Wert von 600 g verwendet. Je mehr Gewicht beaufschlagt wird, desto besser ist die Härte der Beschichtung [DIN 15184, KBA 2017b].

4.3.3 Beta-Napf-Prüfung (β 2-Napf) ohne und mit Sterilisation

Mittels der Beta-Napf-Prüfung lässt sich die Umformbarkeit, insbesondere die Tiefziehfähigkeit, beschichteter Weißbleche beurteilen. Dabei simuliert die Beta-Napf-Prüfung das Tiefziehen, welches für verschiedene Metallverpackungen zum Einsatz kommt.

Die Prüfung ist angelehnt an die europäische Norm EN 1669:1996 – Zipfelprüfung an Blechen und Bändern. Eine beschichtete Blechrunde wird unter Verwendung eines Stempels einer Ziehbeanspruchung ausgesetzt. Dabei erfolgt eine Umformung von einer flachen Weißblechprobe zu einem Napf. Mittels anschließendem Tesa-Test auf der Mantelseite des Napfes kann die Haftung der Beschichtung nach der Ziehbeanspruchung geprüft werden. Zusätzlich kann nach der Umformung eine Sterilisation mit anschließendem Tesa-Test durchgeführt werden [DIN 1669, KBA 2017b].

Der Begriff β 2-Napf impliziert, dass bei der Umformung angestrebte Tiefziehverhältnis β mit dem Wert 2 (hier nur mit Erstzug), welches sich aus dem Rondendurchmesser D und dem Durchmesser des Stempelwerkzeugs d ergibt. Der Index n kennzeichnet die Anzahl der Züge [Doege 2007, Hellwig 2013].

$$\beta = \frac{D}{d_n} \quad (4-3)$$

Ferner treten aufgrund des anisotropen Materialverhaltens bei zylindrischen Ziehteilen teilweise stärkere Dehnungsausprägungen auf, welche als Zipfelbildung bezeichnet werden. Die Zipfligkeit Z wird aus den, durch die Tiefzugbeanspruchung entstandenen, unterschiedlichen Höhen (h_{max} und h_{min}) ermittelt und ist wie folgt definiert [Doege 2007]:

$$Z = \frac{h_{max} - h_{min}}{\frac{1}{2}(h_{max} + h_{min})} \quad (4-4)$$

Probenvorbehandlung

Aus den Weißblechproben sind Ronden mit einem Durchmesser von 8 cm zu schneiden. Dies ist notwendig, um die Weißblechproben in das Prüfgerät einzuführen und später zu einem Napf umformen zu können.

Durchführung der β 2-Napf-Prüfung

Das zu einer Ronde geschnittene Weißblech wird mit der beschichteten Oberfläche nach oben in die Prüfmaschine gelegt. Unter einem Niederhalter wird das Weißblech fixiert.

Anschließend wird ein Stempel von unten her gegen die Weißblechprobe geführt und zu einem faltenlosen Näpfchen geformt [DIN 1669, KBA 2017b].

Durchführung der Sterilisation

Die Näpfe werden zusammen mit VE-Wasser (voll entsalzt) in eine Konservendose gegeben. Die Konservendose wird verschlossen und in einen Sterilisationsofen gegeben. Die Konserve verbleibt in dem Ofen für 30 Min. bei 100°C. Neben VE-Wasser können auch Zitronensäure oder Na₂CO₃-Lösung als Sterilisationsmedien Verwendung finden.

Auswertung ohne Sterilisation

Der Mantel der Näpfchen wird mit einem Stück Tesastreifen beklebt. Dieser wird anschließend gleichmäßig und zügig abgezogen. Geprüft wird visuell, ob Ablösungen der Beschichtung durch den Tesastreifen entstanden sind.

Auswertung mit Sterilisation

Im Anschluss der Sterilisation wird vorerst visuell geprüft, ob durch die Sterilisation Ablösungen der Beschichtung zu erkennen sind. Ist das nicht der Fall, wird der zuvor beschriebene Tesa-Test auf der Mantelseite des Napfes durchgeführt und erneut visuell nach Ablösungen untersucht [KBA 2017b].

Es werden zwei Versuchsreihen vorgenommen. In der ersten Messreihe ist die Beta-Napf-Prüfung mit anschließendem Tesa-Test durchgeführt worden. Bei der zweiten Versuchsreihe findet eine zusätzliche Sterilisation statt. Alle Weißblechproben werden mit zusätzlichem Schutzlack versehen.

4.3.4 Tiefungsversuch mit Sterilisation und Tesa-Test

Mittels des Tiefungsversuchs lässt sich die Widerstandsfähigkeit einer Beschichtung auf einem Substrat beurteilen. Dabei simuliert der Tiefungsversuch Prozesse der Druckweiterverarbeitung wie z. B. das Mantelrillen von Konservendosen. Die Prüfung ist angelehnt an die Norm DIN EN ISO 20482:2013 – Tiefungsversuch nach Erichsen.

Durchführung des Tiefungsversuches

Die Weißblechproben werden in einer Halterung mit der beschichteten Oberfläche nach oben in das Prüfgerät gespannt. Anschließend wird die Probenplatte mit einem halbkugelförmigen

Stößel mit gleichbleibender Geschwindigkeit so in die Matrize gedrückt, dass sich ein kuppelförmiger Eindruck mit der Beschichtung auf der Außenseite bildet [DIN 1520, DIN 20482, KBA 2017b].

Auswertung

Die Tiefung wird mit einem Stück Tesastreifen beklebt. Dieser wird anschließend gleichmäßig und zügig abgezogen. Geprüft wird visuell, ob Ablösungen der Beschichtung infolge des Abziehens des Tesastreifens entstanden sind.

4.4 Versuchsplanung und -durchführung

Die wissenschaftlichen Untersuchungen wurden während eines Entwicklungsprojektes vom Autor bei Koenig & Bauer-MetalPrint, Stuttgart, vorgenommen. Die Versuche wurden zudem in Zusammenarbeit und mit Unterstützung verschiedener Industrieunternehmen durchgeführt:

TK Rasselstein, Andernach

Bereitstellung von Weißblechproben über den gesamten Untersuchungszeitraum sowie gemeinsame Durchführung der Versuche zur Charakterisierung der Umformbarkeit in den Laborräumen von TK Rasselstein.

ZellerGmelin, Eislingen

Durchführung der Farbentwicklung und Bereitstellung von UV-Farben über den gesamten Untersuchungszeitraum sowie gemeinsame Durchführung der Versuche zur Machbarkeit, Farbentwicklung und Vorbehandlungsverfahren.

IOT - Innovative Oberflächentechnologien GmbH, Leipzig

Gemeinsame Durchführung der Vorbehandlungsversuche mittels Excimer-Strahler sowie Durchführung XPS-Analysen.

Emtec - Labor für Elektronenmikroskopie und Materialanalyse, Mannheim

Anfertigung der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen.

4.4.1 Versuchsübersicht

Die Tabelle 4-3 zeigt eine Übersicht zu den durchgeführten Versuchen. Neben der verwendeten Anzahl der Weißbleche, Farben und Vorbehandlungsverfahren zeigt die Tabelle 4-3 ferner die Anzahl und Summe der in den Versuchen durchgeführten Analyse- und Charakterisierungsmethoden. Die Tabelle ist gegliedert in die Versuchsbezeichnung, die Materialien und Vorbehandlungsverfahren sowie in die Analyse- und Charakterisierungsmethoden.

Tabelle 4-3: Übersicht zu den durchgeführten Messungen und Versuchen

Versuchs- bezeichnung	Materialien und Vorbehandlungs- verfahren			Analyse- und Charakterisierungsmethoden									Σ Versuche
	Anzahl der Weißbleche	Anzahl der Farben	Anzahl der Vorbehandlungs- verfahren	Kontaktwinkel- messungen	Gitterschnitttests	Tesa-Tests	XPS-Analyse	Rasterelektronen- mikroskopie	Schlagfaltests	Ritzhärte- Prüfung	Beta-Napf- Prüfungen	Tiefungsversuche	
Machbarkeit	13	1	0-1	13		26							39
Farbentwicklung	5	6	1		60	60							120
Umformbarkeit	5	3	1						30	15	30	15	90
Vorbehandlungs- verfahren	4	1	0-7	32	64	64		24					184
Excimer- Vorbehandlung	4	1	0-1	52	24	24	8						108
Σ Versuche	-	-	-	97	148	174	8	24	30	15	30	15	541

Zur Beurteilung der Benetzungs- und Haftungseigenschaften der UV-Farbe auf den Weißblechen wurden die Kontaktwinkelmessung (vgl. Abschnitt 4.1.1), der Gitterschnitttest (vgl. Abschnitt 4.1.2) sowie der Tesa-Test (vgl. Abschnitt 4.1.3) ausgewählt. Ferner wurden zur Beurteilung der Umformbarkeit der Beschichtung die nach den gängigen Normen (vgl. Abschnitt 2.1.4) anzuwendenden Prüfmethoden (vgl. Abschnitt 4.3) ausgewählt. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (vgl. Abschnitt 4.1.4) wurden zur visuellen Beurteilung des Schichtauftrags angefertigt, während die XPS-Analyse (vgl. Abschnitt 4.2) durchgeführt wurde, um Rückschlüsse auf das Wirkmodell bei UV-Vorbehandlungen ziehen zu können.

4.4.2 Materialien und Vorbehandlungsverfahren

Die nachfolgende Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5 zeigen die in den Versuchen eingesetzten Weißblechproben.

Tabelle 4-4: Übersicht zu denen in den Versuchen eingesetzten Weißblechproben (Teil 1 von 2)

Untersuchung	Nr.	Weißblech	Zinn-Auflage [g/m ²]	Ölaufgabe	Passivierung
Machbarkeitsuntersuchung (5.1)	A1	ETP	2,0	DOS	311
	A2	ETP	2,2	ATBC	311
	A3	ETP	2,0	DOS	300
	A4	ETP	2,8	DOS	Ohne
	A5	ETP	1,4	DOS	311
	A6	ETP	5,6	DOS	311
	A7	ETP	11,2	DOS	311
	A8	ECCS	Chrom	DOS	Ohne
	A9	ETP matt	2,0	DOS	311
	A10	ETP blank	2,8	DOS	311
	A11	ETP	2,8	DOS	Sonderpassivierung
	A12	ECCS PET	PET	DOS	Ohne
	A13	ETP	2,8	DOS	311
Farbentwicklung (5.2)	B1	ETP	2,8	DOS	300
	B2	ETP	5,6	DOS	300
	B3	ETP	2,8	ATBC	300
	B4	ECCS	Chrom	DOS	Ohne
	B5	ECCS PET	PET	DOS	Ohne

Tabelle 4-5: Übersicht zu denen in den Versuchen eingesetzten Weißblechproben (Teil 2 von 2)

Untersuchung	Nr.	Weißblech	Zinn-Auflage [g/m ⁻¹]	Ölaufage	Passivierung
Umformbarkeit (5.3)	C1	ETP	2,8	DOS	300
	C2	ETP	5,6	DOS	300
	C3	ETP	2,8	ATBC	311
	C4	ECCS	Chrom	BSO	311
	C5	ECCS PET	PET	k.A.	311
Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren (5.4)	D1	ETP	2,8	DOS	311
	D2	ETP	5,6	DOS	311
	D3	ECCS	Chrom	DOS	311
	D4	CFPA	k.A.	k.A.	505
Excimer-Vorbehandlung (5.5)	E1	ETP	2,8	DOS	311
	E2	ECCS	Chrom	DOS	311
	E3	CFPA 587	k.A.	k.A.	587
	E4	CFPA 643	k.A.	k.A.	643

Die verwendeten Weißblechproben hatten, mit Ausnahme der Versuche zur Umformbarkeit, ein einheitliches Format:

Format: 45 x 230 mm

Dicke: 0,14 – 0,28 mm

Die während der Versuche zur Umformbarkeit (vgl. Abschnitt 4.3) eingesetzten Formate der Weißblechproben orientierten sich (sofern vorgegeben) an den dazugehörigen Normen.

In der nachfolgenden Abbildung 4-5 sind exemplarisch Weißblechproben dargestellt, wie diese in den Versuchen (am Beispiel der Versuche der Machbarkeitsuntersuchung) eingesetzt werden (mit Ausnahme der Versuche zur Umformbarkeit). Weiterhin sind die Tesa-Tests schematisch angedeutet.

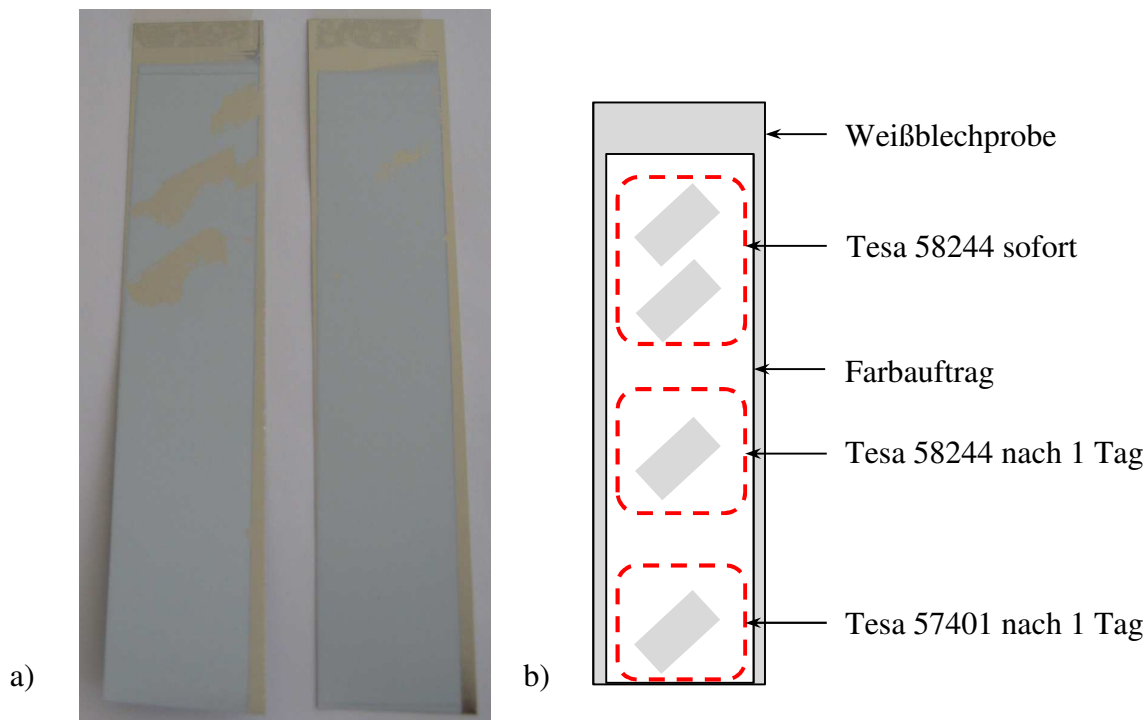


Abbildung 4-5: Beispielhafte Weißblechprobe im Labortest aus den Versuchen zur Machbarkeitsuntersuchung; a) links ohne UV-Vorbehandlung; rechts mit UV-Vorbehandlung; b) schematische Darstellung der Tesa-Test-Bereiche auf den Weißblechproben [eigene Darstellung]

Die Beschichtung der Weißblechproben wurde je Farbe/ Weißblech-Kombination innerhalb der Versuche jeweils nur einmal durchgeführt. Auch die Vorbehandlungsverfahren sind jeweils einmal durchgeführt. Wiederholte Probenbeschichtungen oder Vorbehandlungsverfahren zur statistischen Absicherung wurden nicht durchgeführt. Kontaktwinkelmessungen und Gitterschnitttests inklusive dem Tesa-Test wurden zur statistischen Absicherung mindestens dreimal je Probe durchgeführt. Anhand der Kontaktwinkelmessung wird dies an den Fehlerbalken deutlich (vgl. z. B. Abschnitt 5.1.2, Abbildung 5-1). Zur Darstellung der Ergebnisse der Gitterschnitttests wurde lediglich der Mittelwert herangezogen. Auf eine Darstellung von Fehlerbalken wurde dabei verzichtet. Die Versuche zur Umformbarkeit wurden, wie die Beschichtungen und Vorbehandlungsverfahren,

je Farbe/ Weißblech-Kombination nur einmal durchgeführt. Wiederholte Umformungsversuche gleicher Farbe/ Weißblechkombinationen wurden zur statistischen Absicherung nicht durchgeführt.

Die Tabelle 4-6 zeigt die in den Versuchen eingesetzten Farben.

Tabelle 4-6: Übersicht zu den in den Versuchen eingesetzten Farben mit aufgetragenen Schichtdicken (nass) und Art des UV-Strahlers

Untersuchung	Nr.	Farbe	Schichtdicke [g/m ²]	UV-Strahler
Machbarkeitsuntersuchung (5.1)	TM25-U3-Z2500-4	Weiß	8	UV-Hg. FA. IST Metz
Farbuntersuchung (5.2)	32	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	41	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	42	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	43	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	44	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	45	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
Umformbarkeit (5.3)	110	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	111	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
	119	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren (5.4)	110	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg. FA. IST Metz
Excimer-Vorbehandlung (5.5)	110	Weiß	4,5	UV-Hg. FA. IST Metz

Die Tabelle 4-7 zeigt die in den Versuchen eingesetzten Vorbehandlungsverfahren.

Tabelle 4-7: Übersicht zu den in den Versuchen eingesetzten Vorbehandlungsverfahren

Untersuchung	Eingesetzte Vorbehandlungsverfahren
Machbarkeitsuntersuchung (5.1)	Ohne Vorbehandlung
	UV-Hg. FA. IST Metz
Farbuntersuchung (5.2)	UV-Hg. FA. IST Metz
Umformbarkeit (5.3)	UV-Hg. FA. IST Metz
Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren (5.4)	Ohne Vorbehandlung
	UV-Hg. FA. IST Metz
	UV-C, FA. GEW
	UV-LED, Hersteller unbekannt
	UV-Hg. FA. IST Metz
	2-Propanol-Reinigung/ UV-Hg. FA. IST Metz
	AD-Plasma, Hersteller unbekannt
	Temperatur
Excimer-Vorbehandlung (5.5)	Xe-Excimer-Strahler, FA. IOT

Detaillierte Beschreibungen der in den Versuchen eingesetzten Vorbehandlungsverfahren sind in den Abschnitten 5.4.2 und 5.5.2 aufgeführt.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche vorgestellt. Das Ziel der Versuche besteht darin, Beschichtungen von UV-Farbe auf verschiedenen Weißblechvarianten praxisnah zu untersuchen. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sollen es in Kapitel 7 ermöglichen, Rückschlüsse auf konzeptionelle Folgerungen für eine entsprechende Produktionsanlage ziehen zu können, um ein UV-basierendes Farbsystem direkt auf Weißblech auftragen zu können.

In diesem Zusammenhang wird eingangs die grundsätzliche Machbarkeit (Abschnitt 5.1) untersucht, um mit UV-basierten Farbsystemen direkt auf Weißblech zu drucken. Da Weißblech, im Gegensatz zu Papier, relativ dunkel ist, wird heute vornehmlich thermisch trocknender Weißlack als Außenlack verwendet, um ein kontrastreiches Druckbild zu erhalten. Aus diesem Grund ist die zu untersuchende UV-Farbe in allen Versuchen weiße UV-Farbe. Zum Einsatz kommen zudem eine Vielzahl von Weißblechvarianten sowie verschiedenen Farb Rezepturen (Abschnitt 5.2).

Zur weiteren Evaluierung der Praxistauglichkeit werden in Abschnitt 5.3 die mechanischen und thermischen Belastungen, wie Umformfähigkeit oder Sterilisierfähigkeit, mittels gängiger Normen und Prüfmethoden untersucht. Da die allgemeinen Haftungseigenschaften von UV-basierten Farbsystemen auf Weißblechen bis dato nur unzureichende Ergebnisse erzielen, finden zudem Experimente mit verschiedenen Vorbehandlungsverfahren zur Veränderung der Benetzungs- sowie Haftungseigenschaften in Abschnitt 5.4 statt. Darauf aufbauend wird eine weitere Untersuchung zur Evaluierung der Vorbehandlungsmethode mittels Excimer-Strahler in Abschnitt 5.5 durchgeführt.

5.1 Machbarkeitsuntersuchung

Mit der Machbarkeitsuntersuchung wird untersucht, inwiefern mit UV-härtenden Farbsystemen grundsätzlich eine Haftung erreicht werden kann, wenn diese direkt auf Weißblech aufgetragen werden. Hierzu wird eine größere Variation verschiedener Weißbleche mit einer speziell auf Haftung ausgelegten UV-Weißfarbe bedruckt. Die Proben werden anschließend mittels Tesa-Test überprüft und bewertet. Zudem werden auf den Weißblechen der Kontaktwinkel gemessen sowie die Oberflächenenergie errechnet.

5.1.1 Materialien und Auftrag

Für die Untersuchung werden 13 Weißbleche mit verschiedenen Parametrierungen verwendet. In der nachfolgenden Tabelle 5-1 sind die einzelnen Weißbleche mit der entsprechenden Zinn- und Ölaufgabe sowie der verwendeten Passivierung aufgelistet.

Tabelle 5-1: Eingesetzte Weißbleche (siehe Abschnitt 2.2.1) der Machbarkeitsuntersuchung mit Zinn- und Ölaufgabe (nach Tabelle 2-5) sowie der verwendeten Passivierung (nach Tabelle 2-4)

Nr.	Weißblech	Zinn-Auflage [g/m ²]	Ölaufgabe	Passivierung
A1	ETP	2,0	DOS	311
A2	ETP	2,2	ATBC	311
A3	ETP	2,0	DOS	300
A4	ETP	2,8	DOS	ohne
A5	ETP	1,4	DOS	311
A6	ETP	5,6	DOS	311
A7	ETP	11,2	DOS	311
A8	ECCS	Chrom	DOS	ohne
A9	ETP matt	2,0	DOS	311
A10	ETP blank	2,8	DOS	311
A11	ETP	2,8	DOS	Sonderpassivierung
A12	ECCS PET	PET	DOS	ohne
A13	ETP	2,8	DOS	311

Von der Fa. ZellerGemlin wird für diese Versuchsreihe eine radikalisch-härtende UV-Farbe (TM25-U3-Z2500-4) zur Verfügung gestellt, welche eigens für diese Versuchszwecke rezeptiert wurde.

Tabelle 5-2: Eingesetzte Farbe der Machbarkeitsuntersuchung mit aufgetragener Schichtdicke (nass), Art des UV-Strahlers und Durchlaufgeschwindigkeit

Nr.	Farbe	Schichtdicke [g/m ²]	UV-Strahler	Durchlaufgeschwindigkeit [m/Min.]
TM25-U3-Z2500-4	Weiß	8	UV-Hg, Fa. IST Metz	50

Zur Applikation der UV-Farbe kommt ein Andruckgerät der Fa. Prüfbau zum Einsatz. Bei diesem Andruckgerät wird die Farbe aufgewalzt. Zur Bestimmung des Auftragsgewichts wird das Delta der entnehmbaren Andruckrollen vor und nach dem Auftrag mittels Wiegen ermittelt.

Methode zum Auftrag der UV-Farbe

Bei einer vorhergehenden Beurteilung der UV-Farbe wurde festgestellt, dass mit einem zweimaligen Walzauftrag ein der Praxis näherer Weißgrad auf dem Weißblech erzielt werden kann. Aus diesem Grund werden alle Weißbleche mit zwei separaten Überrollungen „nass-in-nass“ mit der Farbe bedruckt. Der Farbauftrag beträgt durchschnittlich 8 g/m² mit einer Abweichung von $\pm 0,5$ g/m². Im ersten Auftrag sind ca. 5 g/m² aufgetragen, im zweiten ca. 3 g/m².

Einsatz einer UV-Vorbehandlung

Werden auf Kunststoffoberflächen durch Plasmavorbehandlung positive Effekte hinsichtlich der Benetzbarkeit erzielt [Egitto 1994, Ryntz 1994, Westerlind 1987], so zeigt auch eine Behandlung von Metalloberflächen eine signifikante Verbesserung der Benetzbarkeit. Durch im Plasma enthaltene Verbindungen erfolgt eine Reaktion mit an der Substratoberfläche vorhandenen Kohlenstoffverunreinigungen [Maeda 1983]. Dabei werden gasförmige Produkte gebildet, die von der Oberfläche desorbieren. Zurück bleibt eine gereinigte Metalloberfläche, die eine Reduktion des Kontaktwinkels bei der Benetzung mit Flüssigkeit durch eine erhöhte Oberflächenenergie ermöglicht [Strohmeier 1989]. Eine Alternative zur

Plasmabehandlung stellt die Oberflächenaktivierung durch die Verwendung von UV-Strahlungssystemen, respektive der damit verbundenen oberflächennahen Bildung von O_3 , dar. Auf Polyurethanoberflächen, welche mit UV-Strahlen vorbehandelt wurden, konnte die Benetzbarkeit im Vergleich zum Ausgangszustand durch die nachgewiesene Entstehung hydrophiler C–O- und C=O-Bindungen bereits verbessert werden [KBA 2017c, Kuang 2015]. Die Auswirkung einer UV-Vorbehandlung auf Weißblechen wurde bislang noch nicht untersucht. Daher wird in einer parallel verlaufenden Versuchsreihe vor dem Auftrag der UV-Farbe das blanke Weißblech ebenfalls durch den UV-Hg-Strahler geführt, um zu prüfen, ob dies die Haftungseigenschaften der UV-Farbe beeinflusst.

UV-Strahler

Bei dem verwendeten UV-Strahler handelt es sich um eine Laboranlage der Fa. IST Metz. Es können Einstellungen an der Geschwindigkeit des Förderbandes [m/Min.] sowie der Strahlungsleistung [W/cm] vorgenommen werden. Für die Härtung sowie die Vorbehandlung werden gleiche Einstellungen verwendet.

Geschwindigkeit	: 50 m/Min.
Strahlungsleistung (elektrisch)	: 200 W/cm
Durchlaufzeit im Wirkungsbereich des Strahlers	: ~ 0,12 Sek.

Einsatz des UV-Strahlers

Nachdem die Probebleche mit der UV-Farbe bedruckt sind, werden diese auf das Förderband des UV-Strahlers gelegt. Auf der Auslagenseite des UV-Strahlers werden die Weißbleche anschließend entnommen. Damit ist eine Härtung der UV-Farbe auf dem Weißblech gewährleistet.

Unter Berücksichtigung der UV-Vorbehandlung werden die Probebleche sowohl vor als auch nach dem Druck der Farbe auf das Förderband des UV-Strahlers gelegt. Der Vorgang der UV-Vorbehandlung unterscheidet sich nicht von dem der UV-Härtung. Auf der Auslagenseite des UV-Strahlers werden die Weißbleche nach der Vorbehandlung und nach der Härtung wieder entnommen.

5.1.2 Benetzungseigenschaften

Die Weißbleche werden ohne Farbauftrag eingangs einer Kontaktwinkelmessung unterzogen, um Unterschiede der Benetzungseigenschaften zu bestimmen. Die Messung wird mit dem PGX+ Pocket Goniometer (siehe Abschnitt 4.1.1) durchgeführt. In der folgenden Abbildung 5-1 sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung aufgeführt:

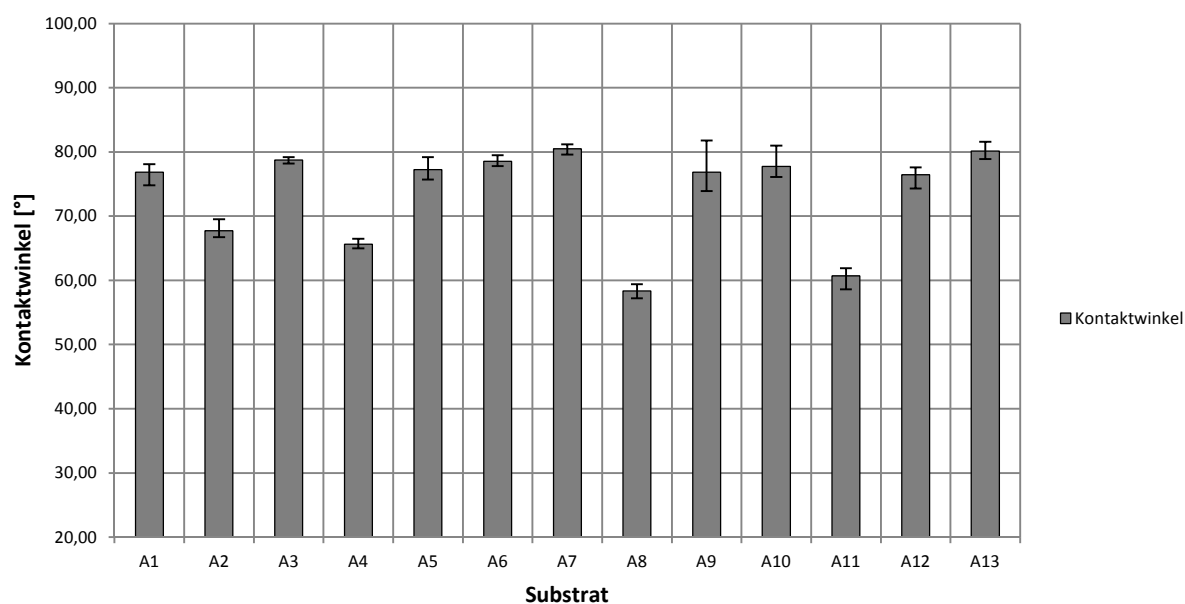


Abbildung 5-1: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung der Machbarkeitsuntersuchung

Der Kontaktwinkel liegt bei den Weißblechsorten A1, A3, A5, A6, A7, A9, A10, A12 und A13 zwischen $76,47^\circ$ und $80,50^\circ$ auf einem annähernd gleichen Niveau, während die Weißbleche A2 (ATBC-Ölaufuge), A4 (ohne Passivierung), A8 (ECCS) und A11 (Sonderpassivierung) geringere Werte aufweisen. Um welche Art der Passivierung es sich bei Weißblech A11 im Besonderen handelt, ist nicht bekannt.

Aus der Messung der Kontaktwinkel erfolgt die Berechnung der Oberflächenenergie des Festkörpers nach Gleichung (4-1). Die Werte für die Oberflächenenergie sind in der nachfolgenden Abbildung 5-2 dargestellt.

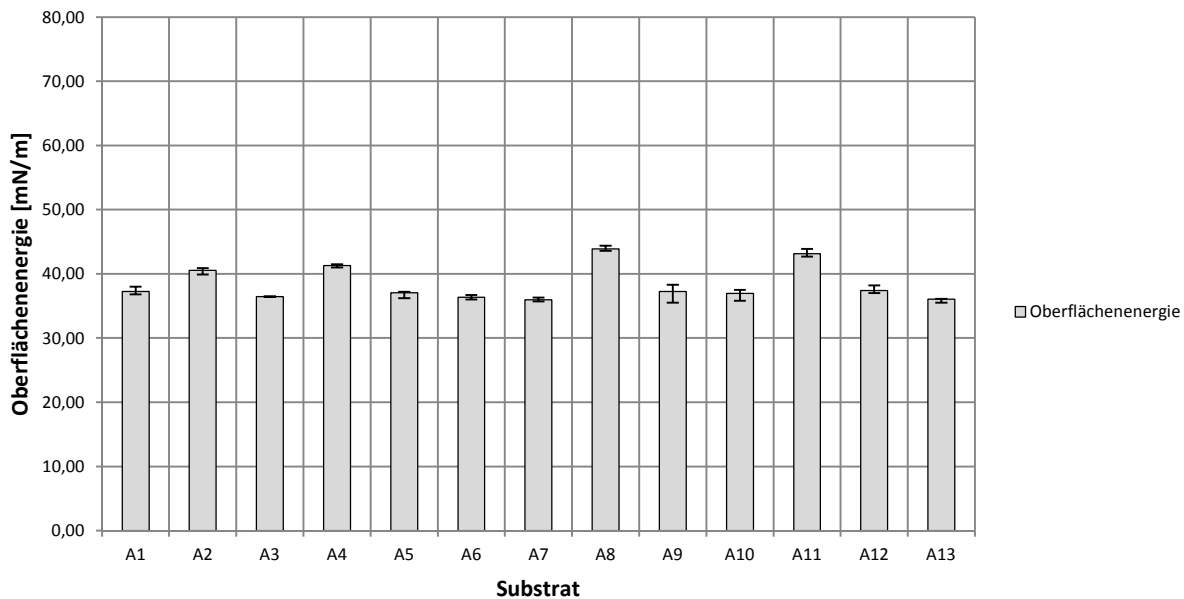


Abbildung 5-2: Berechnete Oberflächenenergie für 13 Weißblechproben der Machbarkeitsuntersuchung

Die Werte der Weißbleche A2, A4, A8 und A11 liegen mit 40,53 mN/m bis 43,90 mN/m höher als die der übrigen Weißblechproben.

5.1.3 Tesa-Test und UV-Vorbehandlung

Nach dem Auftrag der UV-Farbe wird der Tesa-Test auf den Weißblechproben angewandt. Dabei zeigt sich, dass eine Haftung von UV-härtenden Farbsystemen grundsätzlich erzielt werden kann, wenn diese direkt auf das Weißblech aufgetragen werden. Die Haftung unmittelbar nach dem Auftrag ist relativ schwach. Dies zeigt sich in Form von Ablösungen durch die Anwendung des Tesa-Tests. Bei wiederholtem Tesa-Test 24 Std. nach dem Auftrag bleibt mehr UV-Farbe auf dem Weißblech haften. Das Ergebnis der Haftung ist sehr gut. Dieser Test wurde mit zwei verschiedenen Klebestreifentypen durchgeführt.

Bei der Untersuchung mit der zusätzlich durchgeführten UV-Vorbehandlung zeigt sich, dass eine allgemein stärkere oder zumindest gleichwertigere Haftung der UV-Farbe auf den untersuchten Weißblechproben erzielt werden kann. Dies wird durch geringere Ablösungen während des Tesa-Tests deutlich.

Eine grundsätzliche Haftung der UV-Farbe auf Weißblech konnte mit den Versuchen der Machbarkeitsuntersuchung verifiziert werden.

5.2 Farbentwicklung

Nachdem eine grundsätzliche Haftung der UV-Farbe auf verschiedenen Weißblechen nachgewiesen werden konnte, konzentriert sich diese Untersuchung auf die zu testenden Farben. Die Fa. ZellerGmelin stellt für diese Untersuchung eine Vielzahl von Farb Rezepturen zur Verfügung, welche auf einen reduzierten Umfang an Weißblechen aufgetragen werden. Dies erlaubt der Fa. ZellerGmelin die Entwicklung eines tieferen Verständnisses zur Formulierung der UV-Farbe für die Anwendung auf Weißblech.

Im Rahmen dieser Untersuchung soll zudem die Prüfung der Haftungseigenschaften zwischen den Industriepartnern vereinheitlicht werden. Dazu wird zum einen der Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 durchgeführt sowie die von TK Rasselstein benutzte Tesa-Variante 4124 als Versuchsstandard definiert.

5.2.1 Materialien und Auftrag

Ausgehend von der Machbarkeitsuntersuchung wird die Anzahl der Weißblechvarianten von 13 auf 5 reduziert. Die Auswahl der Weißbleche wird so durchgeführt, dass eine Variation handelsüblicher Weißbleche im Versuchsumfang enthalten bleibt. In der nachfolgenden Tabelle 5-3 sind die verwendeten Weißbleche aufgelistet.

Tabelle 5-3: Eingesetzte Weißbleche (siehe Abschnitt 2.2.1) der Farbentwicklung mit Zinn- und Ölaufgabe (nach Tabelle 2-5) sowie der verwendeten Passivierung (nach Tabelle 2-4)

Nr.	Substrat	Zinn-Auflage [g/m ⁻¹]	Ölaufgabe	Passivierung
B1	ETP	2,8	DOS	300
B2	ETP	5,6	DOS	300
B3	ETP	2,8	ATBC	300
B4	ECCS	Chrom	DOS	ohne
B5	ECCS PET	PET	DOS	ohne

Eine Aufstellung der UV-Farben findet sich in der nachfolgenden Tabelle 5-4. Bei den verwendeten Farben handelt es sich um UV-härtende Weißfarben. Weitere Informationen zu der UV-Farbe liegen seitens der Fa. ZellerGmelin nicht vor.

Tabelle 5-4: Eingesetzte Farben der Farbentwicklung mit aufgetragener Schichtdicke (nass), Art des UV-Strahlers und Durchlaufgeschwindigkeit

Nr.	Farbe	Farbauftrag [g/m ²]	UV-Strahler	Durchlaufgeschwindigkeit [m/Min.]
32	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
41	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
42	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
43	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
44	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
45	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50

Methode zum Auftrag, UV-Härtung und UV-Vorbehandlung der UV-Farbe

Das Weißblech wird mit zweimaligem Walzauftrag versehen. Im Gegensatz zur Machbarkeitsuntersuchung wird nicht „nass-in-nass“ aufgetragen, sondern mit einer Zwischenhärtung „nass-auf-trocken“. Der Farbauftrag beträgt durchschnittlich 9 g/m² mit einer Abweichung von $\pm 0,5$ g/m². Im ersten Auftrag werden ca. 4,5 g/m² aufgetragen, im zweiten ca. 4,5 g/m².

Die Einstellungen des UV-Strahlers zu den Zwecken der UV-Härtung sowie der UV-Vorbehandlung bleiben mit denen der Machbarkeitsuntersuchung identisch.

Geschwindigkeit : 50 m/Min.
 Strahlungsleistung (elektrisch) : 200 W/cm
 Durchlaufzeit im Wirkbereich des Strahlers : ~ 0,12 Sek.

5.2.2 Gitterschnitttest

Zur Anwendung kommt der Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 (siehe Abschnitt 4.1.2) in Kombination mit dem Tesa-Test (siehe Abschnitt 4.1.3). Zur Beurteilung der Ergebnisse wird die in Tabelle 4-1 aufgeführte Bewertungsskala des Gitterschnitttests benutzt. Die Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die Bewertungsergebnisse der UV-Farben auf den Weißblechen mit sofortigem und 24 Std. verzögertem Gitterschnitttest:

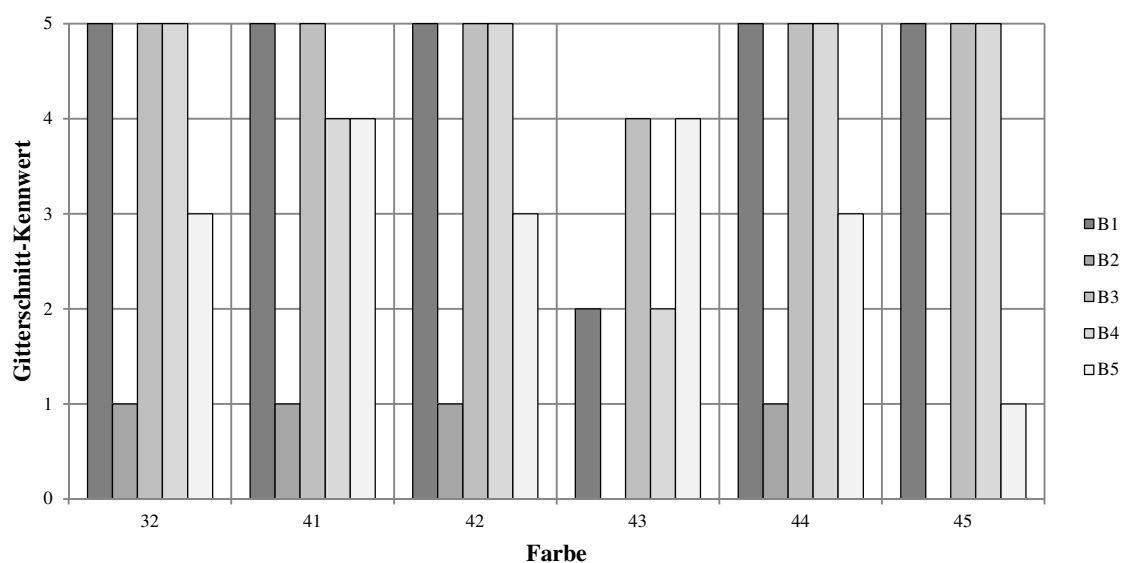


Abbildung 5-3: Gitterschnitt-Kennwerte unmittelbar nach dem Auftrag

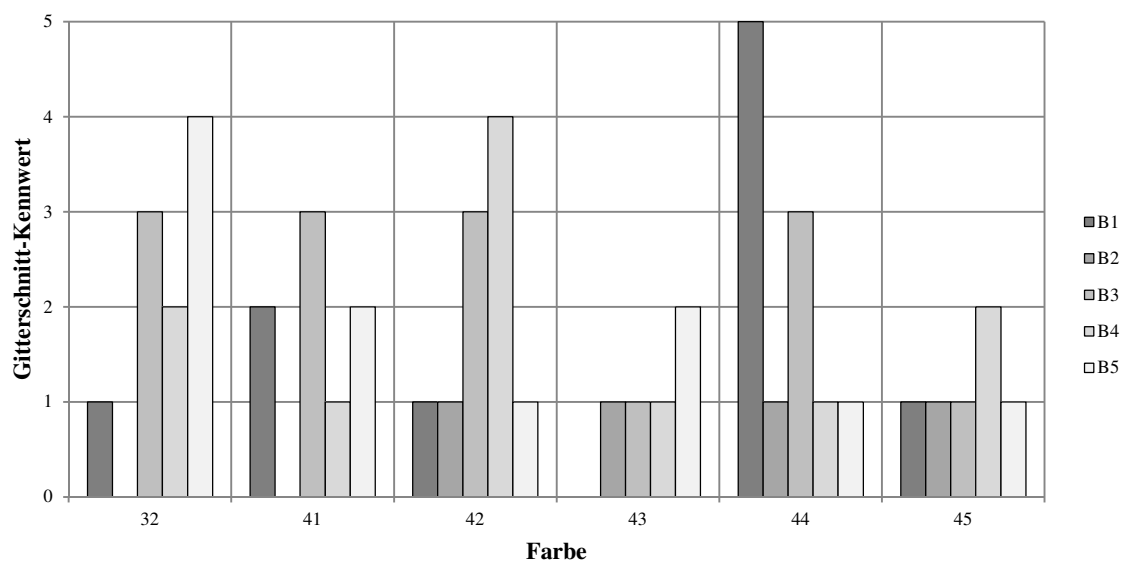


Abbildung 5-4: Gitterschnitt-Kennwerte 24 Std. nach dem Auftrag

Bei den untersuchten Farben hat UV-Farbe Nr. 43 das beste Ergebnis im Gitterschnitttest erzielt. Bereits unmittelbar nach dem Auftrag werden, im Vergleich zu den übrigen UV-Farben, verminderte Gitterschnitt-Kennwerte erzielt. Das allgemeine Niveau der sofortigen Gitterschnitt-Kennwerte ist jedoch durchgehend „mangelhaft“.

Die Gitterschnitt-Kennwerte 24 Std. nach dem Auftrag verdeutlichen die starke Nachhärtung der verwendeten UV-Farben. Die Ergebnisse sind für die UV-Farben Nr. 43 und Nr. 45 als „gut“ zu beurteilen, während die übrigen UV-Farben lediglich als „befriedigend“ bis „unbefriedigend“ bewertet sind.

Bei Betrachtung der Weißbleche weist B2 (ETP mit DOS-Ölaufgabe und einer erhöhten Zinn-Auflage von 5,6 g/m²) bei beiden Gitterschnittversuchen die stärkste Haftung auf. Die Art der Passivierung auf diesem Weißblech (300) unterscheidet sich jedoch von Weißblech A6 mit Passivierung (311) der Machbarkeitsuntersuchung, wodurch eine Vergleichbarkeit erschwert wird.

Fotografien der Weißblechproben dieser Untersuchung sind in Anhang A.1 abgebildet.

5.3 Umformbarkeit

Aufgrund der Ergebnisse der beiden vorhergehenden Untersuchungen konnte die UV-Farbezeptur von der Fa. ZellerGmelin soweit vorangebracht werden, dass die UV-Farbe weitergehenden Untersuchungen unterworfen werden kann. Dazu sollen die für Metallverpackungen üblichen mechanischen Umformungsbeanspruchungen, welche vornehmlich in den Weiterverarbeitungsprozessen auftreten, im Labormaßstab geprüft werden. Zweck der Untersuchung ist es, in Erfahrung zu bringen, inwieweit die neuen Farbezepturen den mechanischen Umformungsbeanspruchungen der Druckweiterverarbeitung im Hinblick auf deren Haftungseigenschaften standhalten.

5.3.1 Materialien und Auftrag

Die in dieser Untersuchung verwendeten Weißbleche entsprechen denen, die innerhalb der Farbentwicklung verwendet wurden. Unterschiede sind in der Art der Passivierung und der Ölaufgabe zu verzeichnen. Drei Weißbleche sind verzinkt, zwei weitere verchromt, wobei eines der verchromten Weißbleche mit einer PET-Folie beschichtet wurde. Die genauen Weißblechspezifikationen sind in Tabelle 5-5 aufgeführt. Die Weißbleche werden von TK Rasselstein zur Verfügung gestellt.

Tabelle 5-5: Eingesetzte Weißbleche (siehe Abschnitt 2.2.1) der Umformbarkeitsuntersuchung mit Zinn- und Ölaufgabe (nach Tabelle 2-5) sowie der verwendeten Passivierung (nach Tabelle 2-4)

Nr.	Weißblech	Zinn-Auflage [g/m ²]	Ölaufgabe	Passivierung
C1	ETP	2,8	DOS	300
C2	ETP	5,6	DOS	300
C3	ETP	2,8	ATBC	311
C4	ECCS	Chrom	BSO	311
C5	ECCS PET	PET	k.A.	311

Die zu untersuchenden UV-Farben werden von der Fa. ZellerGmelin bereitgestellt und können anhand der Farbnummer unterschieden werden. Zudem sind in Tabelle 5-6 der Farbauftrag, der UV-Strahler und die verwendete Durchlaufgeschwindigkeit vermerkt.

**Tabelle 5-6: Eingesetzte Farbe der Umformbarkeitsuntersuchung mit aufgetragener Schichtdicke (nass),
Art des UV-Strahlers und Durchlaufgeschwindigkeit**

Nr.	Farbe	Farbauftrag [g/m ²]	UV-Strahler	Durchlaufgeschwindigkeit [m/Min.]
110	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
111	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50
119	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg, Fa. IST Metz	50

Methode zum Auftrag, UV-Härtung und UV-Vorbehandlung der UV-Farbe

Der Farbauftrag erfolgt analog zur Untersuchung der Farbentwicklung „nass-auf-trocken“ mit zweimaligem Walzauftrag von jeweils 4,5 g/m² mit einer Abweichung von $\pm 0,5$ g/m². Zur UV-Härtung und UV-Vorbehandlung wird ebenfalls der UV-Strahler der Fa. IST Metz mit folgenden Einstellungen verwendet:

Geschwindigkeit : 50 m/Min.
 Strahlungsleistung (elektrisch) : 200 W/cm
 Durchlaufzeit im Wirkungsbereich des Strahlers : ~ 0,12 Sek.

Zusätzlicher Auftrag von Schutzlack

Zur praxisnahen Prüfung der Umformbarkeit wird typischerweise der Gesamtauftrag untersucht. Aus diesem Grund werden die Weißbleche mit einem thermisch trocknenden Schutzlack versehen (Akzo Nobel 452.085). Der Schutzlack wird mit einem Ziehrakel manuell aufgetragen. Die dabei verwendete Rakel erzeugt eine Schichtdicke von ca. 5-6 g/m². Die Trocknung des Schutzlackes erfolgt bei 190°C für 13 Min..

Tabelle 5-7: Prüfungen mit Hinweis auf den Einsatz des zusätzlichen Schutzlackauftrags

Prüfung	Schutzlackauftrag
Schlagfalttest	ohne/ mit
Ritzhärteprüfung	mit
Beta-Napf/ Tesa-Test	mit
Beta-Napf/ Sterilisation	mit
Tiefung/ Sterilisation/ Tesa-Test	mit

5.3.2 Schlagfalttest

Die erste Testreihe zur Untersuchung der Umformbarkeit befasst sich mit dem Schlagfalttest, welcher in Abschnitt 4.3.1 beschrieben ist. In der nachfolgenden Abbildung 5-5 sind die Ergebnisse des Schlagfalttests aufgeführt. Diese Testreihe wird sowohl mit (keine Kennzeichnung in Abbildung 5-5) als auch ohne (Kennzeichnung in Abbildung 5-5: ohne Schutzlack) zusätzlichen Schutzlackauftrag durchgeführt.

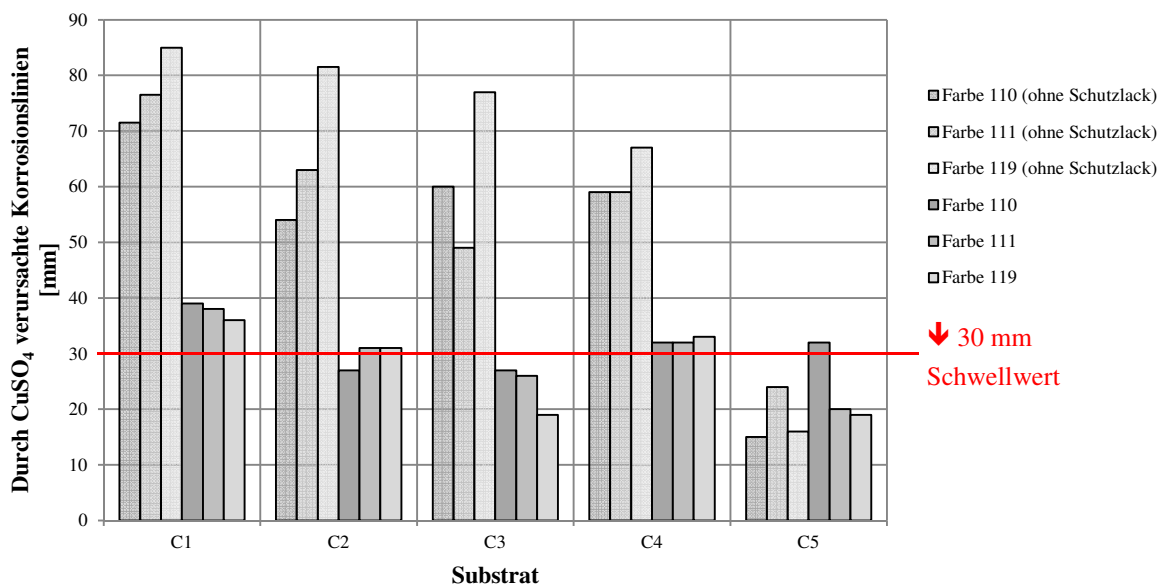


Abbildung 5-5: Ergebnisse des Schlagfalttests

Die durch CuSO_4 verursachten Korrosionslinien auf den Weißblechen wurden mit einem Lineal messtechnisch ermittelt. Als Schwellwert wird der von TK Rasselstein verwendete Wert von 30 mm Streckenlänge verwendet. Je geringer die Korrosionslinie auf dem Weißblech ausgebildet ist, desto weniger Risse sind in der Beschichtung durch die Prüfung entstanden und desto besser ist das Umformungsverhalten der Beschichtung. Es wurden zwei Messreihen geprüft. In der ersten Messreihe wurde das beschichtete Weißblech ohne zusätzlichen Schutzlack geprüft, in der zweiten Messreihe mit zusätzlichem Schutzlack [KBA 2017b].

Abbildung 5-5 stellt die gemessenen Ergebnisse der auf den Weißblechen durch CuSO_4 entstandenen Korrosionslinien, nach Durchführung des Schlagfalttests, in einem Diagramm dar. Der Schwellwert der Korrosionslinie ist mit 30 mm von TK Rasselstein definiert und sollte nicht überschritten werden. Die Weißbleche ohne Schutzlackauftrag weisen lange Korrosionslinien von > 49 mm (bspw. Weißblech C3 mit Farbe Nr. 111) auf. Ausnahme bildet das Weißblech C5, welches durch die zusätzliche PET-Beschichtung vor Korrosion geschützt ist.

Mit zusätzlichem Schutzlackauftrag sind deutlich kürzere Korrosionslinien zu erkennen, die sich im Bereich um den Schwellwert von 30 mm bewegen. Typischerweise werden derartige Prüfungen grundsätzlich mit einem Schutzlack durchgeführt.

Die Farben mit den Nr. 110, 111 und 119 bewegen sich jeweils auf einem ähnlichen Niveau. Eine Differenzierung oder Bewertung der Farben untereinander ist nicht möglich. Allgemein kann gesagt werden, dass alle Farben im kritischen Bereich des Schwellwertes geprüft sind. Jede Farbe hat den Schwellwert dreimal über- und zweimal unterschritten.

5.3.3 Ritzhärte-Prüfung

Die zweite Versuchsreihe befasst sich mit der Ritzhärte-Prüfung, welche in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wurde. In Abbildung 5-6 sind die Ergebnisse der Ritzhärte-Prüfung dargestellt. Alle Versuche finden mit zusätzlich appliziertem Schutzlack statt. Versuche ohne Schutzlackauftrag wurden nicht durchgeführt.

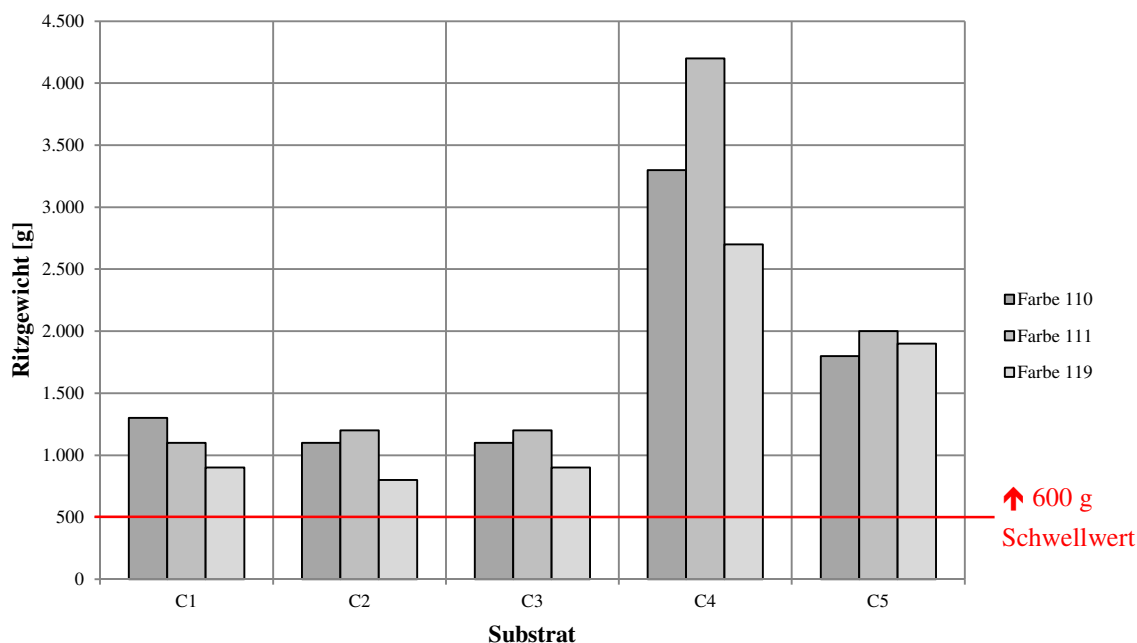

















Abbildung 5-6: Ergebnisse der Ritzhärte-Prüfung

Bei der Ritzhärte-Prüfung (siehe Abschnitt 4.3.2) haben alle Farbe-Weißblech-Kombinationen den Schwellwert von 600 g überschritten. Die Prüfung ist damit als positiv zu beurteilen. Die Farbe Nr. 119 zeigt im Vergleich zu den Farben Nr. 110 und Nr. 111 leicht geminderte Werte, liegt aber noch über dem Schwellwert. Die Farben Nr. 110 und Nr. 111 sind gleich gut zu bewerten. Sehr deutlich ist die Abhängigkeit des Weißbleches zu erkennen. Bei den verchromten Weißblechen (C4 und C5) wird wesentlich mehr Gewicht benötigt, bis die Beschichtung durchdrungen ist. Zu beachten ist, dass bei der Ritzhärte-Prüfung vornehmlich die Belastbarkeit des Schutzlacks geprüft wird.

5.3.4 Beta-Napf-Prüfung (β 2-Napf)




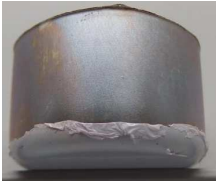











In Tabelle 5-8 sind die durch die Beta-Napf-Prüfung geformten Weißblechnäpfe abgebildet. Am Mantel der Näpfe wurde zusätzlich der Tesa-Test durchgeführt. Alle Versuche werden mit aufgetragenem Schutzlack durchgeführt. Versuche ohne zusätzlichen Schutzlackauftrag wurden nicht durchgeführt.

Tabelle 5-8: Geformte Weißblechnäpfe der Beta-Napf-Prüfung mit Tesa-Test und zusätzlichem Schutzlackauftrag

Substrat	UV-Farbe 110	UV-Farbe 111	UV-Farbe 119
C1 ETP	 Leichte Ablösung	 Leichte Ablösung	 Leichte Ablösung
C2 ETP	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung
C3 ETP	 Mittlere Ablösung	 Mittlere Ablösung	 Mittlere Ablösung
C4 ECCS	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung
C5 ECCS PET	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung

In Tabelle 5-9 sind die durch die Beta-Napf-Prüfung geformten Weißblechnäpfe abgebildet. Nach der Beta-Napf-Prüfung wurde zudem eine Sterilisationsprüfung durchgeführt. Aufgrund der dadurch entstandenen Ablösungen am Mantel konnte kein Tesa-Test durchgeführt werden. Alle Versuche werden mit aufgetragenem Schutzlack durchgeführt.

Tabelle 5-9: Geformte Weißblechnäpfe der Beta-Napf-Prüfung mit anschließender Sterilisation

Substrat	UV-Farbe 110	UV-Farbe 111	UV-Farbe 119
C1 ETP	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung
C2 ETP	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung
C3 ETP	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung
C4 ECCS	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung	 Vollständige Ablösung
C5 ECCS PET	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung	 Keine Ablösung

Ohne Sterilisation (vgl. Tabelle 5-8)

Die UV-Farben haften trotz der mechanischen Beanspruchung aufgrund der Beta-Napf-Umformung vollständig auf den Weißblechen. Zu beobachten ist eine verstärkte Abhängigkeit des Weißbleches und weniger Unterschiede der UV-Farben zueinander. Verminderte Haftungen sind auf den Weißblechen C1 und C3 aufgrund des Tesa-Tests am Napfmantel zu beobachten. Die stärksten Ablösungen nach dem Tesa-Test sind auf Weißblech C3 bei den Farben Nr. 111 und Nr. 119 zu erkennen. Die Ablösungen auf Weißblech C1 sind im Vergleich zu Weißblech C3 eher marginal. Auf den Weißblechen C2, C4 und C5 konnten keine Ablösungen beobachtet werden.

Mit Sterilisation (vgl. Tabelle 5-9)

Die Beurteilung der Weißblechnäpfe zeigt, dass die Haftungsgrenze aller Farben überschritten ist. Auf den Weißblechen C1 bis C4 sind die UV-Farben im gezogenen Mantelbereich vollständig durch die Sterilisation abgelöst. Lediglich auf Weißblech C5 blieben die UV-Farben haften. Auf einen Tesa-Test wurde vollständig verzichtet, da alle Farben die Anforderungen dieses Tests nicht erfüllten.

5.3.5 Tiefungsversuch

In Tabelle 5-10 sind die geformten Weißblechproben des Tiefungsversuchs abgebildet. An den Proben wurde nach dem Tiefungsversuch eine Sterilisationsprüfung sowie ein Tesa-Test durchgeführt. Zudem wurde auf allen Weißblechen vor dem Tiefungsversuch ein Schutzlack aufgetragen.
















Die Ergebnisse des Tiefungsversuchs mit anschließender Sterilisation und Tesa-Test sind als durchgehend „gut“ zu beurteilen. Alle UV-Farben bleiben auf den Weißblechen haften. Ausnahmen bilden folgende Versuchskombinationen:

- Blech C3 (ETP)/ Farbe 119: geringe Ablösungen nach Tesa-Test
- Blech C4 (ECCS)/ Farbe 119: farbliche Veränderungen der Beschichtung

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Beta-Napf-Prüfung mit Sterilisationsprüfung bleiben die UV-Farben nach durchgeführtem Tiefungsversuch mit Sterilisationsprüfung haften. Die Farbe 119 zeigt im Vergleich zu den Farben 110 und 111 aufgrund der Ablösungen auf

Weißblech C3 (ETP) eine verminderte Haftung. Eine Abhängigkeit vom Weißblech wie bei der Beta-Napf-Prüfung ist nicht zu beobachten.

Tabelle 5-10: Weißblechproben nach durchgeführtem Tiefungsversuch, anschließender Sterilisationsprüfung und Tesa-Test

Blechnummer	UV-Farbe 110	UV-Farbe 111	UV-Farbe 119
C1 ETP			
C2 ETP			
C3 ETP			
C4 ECCS			
C5 ECCS PET			

5.3.6 Ergebnisse der Umformungsuntersuchungen

Geprüft wurden die Haftungseigenschaften der UV-Farben Nr. 110, Nr. 111 und Nr. 119 auf verschiedenen Weißblechen. Im Allgemeinen liegen die Ergebnisse der drei UV-Farben relativ dicht beieinander. Vielmehr wird eine Abhängigkeit des Weißbleches deutlich.

Tabelle 5-11: Überblick der Ergebnisse der Prüfungen zur Umformung

Prüfung	Schutzlack	UV-Farbe 110	UV-Farbe 111	UV-Farbe 119
Schlagfalttest	ohne	✗	✗	✗
Schlagfalttest	mit	✓ (Grenzbereich)	✓ (Grenzbereich)	✓ (Grenzbereich)
Ritzhärte-Prüfung	mit	✓	✓	✓
Beta-Napf/ ohne Sterilisation	mit	✓	✓	✓
Beta-Napf/ mit Sterilisation	mit	✗	✗	✗
Tiefung/ mit Sterilisation/ Tesa-Test	mit	✓	✓	✓ (vermindert)

Der erste Schlagfalttest wurde ohne zusätzlichen Schutzlackauftrag durchgeführt. Alle UV-Farben konnten den Test nicht bestehen. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die UV-Farben nicht als Protektionsschicht ausgelegt sind bzw. keine Schutzlackfunktionen erfüllen.

Im den weiteren Versuchen mit zusätzlichem Schutzlack zeigt sich ein anderes Bild. Die Schichtsysteme aus UV-Farbe und Schutzlack bewegen sich im Grenzbereich des Schwellwertes. Das Ergebnis kann akzeptiert werden. Dennoch sollten die UV-Farben im Hinblick auf Haftung und Geschmeidigkeit nach der UV-Härtung weiter verbessert werden. Unbekannt ist, welche Werte mit thermisch trocknenden Lacken und dem verwendeten Schutzlack erreicht werden und welches Ergebnis bei Verwendung eines UV-härtenden Schutzlackes erzielt werden kann.

Bei der Ritzhärte-Prüfung können die Schichtsysteme den erforderlichen Schwellwert überbieten. Eine Abhängigkeit des Weißblechs ist deutlich zu erkennen. Die Unterschiede der UV-Farben zueinander sind marginal. Auch bei diesem Test stellt sich die Frage, welches Ergebnis mit einem UV-härtenden Schutzlack anstelle des thermisch trocknenden Schutzlackes erzielt werden kann.

Bei der Beta-Napf-Prüfung ohne Sterilisation zeigt sich wieder eine stärkere Abhängigkeit vom Weißblech. Durch den Tesa-Test hervorgerufene Ablösungen korrelieren mit der Weißblechvariante, nicht jedoch mit der verwendeten UV-Farbe. So wurden bei den

Weißblechen C1 und C3 (jeweils ETP) ähnlich starke Ablösungen mit allen UV-Farben festgestellt.

Während der Beta-Napf-Prüfung mit anschließender Sterilisation kam es zu vollständigen Ablösungen im Streckbereich (Mantel) nach der Sterilisationsprüfung. Lediglich auf Weißblech C5 (ECCS PET) blieb die UV-Farbe haften. Auf einen Tesa-Test wurde verzichtet, da keine Farbe mehr auf der Mantelfläche vorhanden war. Als Ergebnis des Tests kann gesagt werden, dass alle UV-Farben für Produkte mit Materialstreckung und anschließender Sterilisation ungeeignet sind. Eine Verbesserung der Farbeigenschaften sollte diesbezüglich verfolgt werden.

Als letzter Test dieser Versuchsreihe wurde der Tiefungsversuch mit anschließender Sterilisation durchgeführt. Die Weißblechproben werden im Vergleich zur Beta-Napf-Prüfung weniger stark beansprucht, dennoch praxisorientiert umformt. Alle UV-Farben können in diesem Test ein positives Bild liefern. Lediglich bei Farbe 119 gab es bei zwei Weißblechproben (C3 ETP, C4 ECCS) Auffälligkeiten.

5.4 Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren

In den vorhergehenden Versuchsreihen Machbarkeitsuntersuchung (Abschnitt 5.1) und Farbentwicklung (Abschnitt 5.2) hat sich gezeigt, dass sich durch eine Vorbehandlung von Weißblechen mittels UV-Strahlung die Haftungseigenschaften einer anschließend aufgetragenen UV-Farbe signifikant verbessern lassen. Aus diesem Grund wird im Folgenden untersucht, wie verschiedene Vorbehandlungsverfahren die Haftungseigenschaften von UV-härtenden Farbsystemen auf Weißblech beeinflussen.

5.4.1 Materialien und Auftrag

Die für diese Versuchsreihe verwendeten Weißbleche entsprechen, wie schon in den zuvor durchgeführten Versuchsreihen, typischen Weißblechen (ETP, ECCS und CFPA nach Abschnitt 2.2.1), wie sie für Metallverpackungen Verwendung finden. Zum Schutz vor Korrosion sind diese unter anderem durch einen elektrochemischen Passivierungsvorgang (311) behandelt (nach Tabelle 2-4). Zudem ist ein dünner Ölfilm aus Dioctylsebacat (DOS) aufgetragen (nach Tabelle 2-5). Dieser Ölfilm wird im Zuge des weiteren Verarbeitungsprozesses nicht entfernt und bleibt an der Oberfläche der Tafeln anhaften. Zusätzlich wird CFPA-Weißblech verwendet, für welches eine Titan/ Zirkonium-Schicht als Passivierung (505) dient. Zur Beschichtung wird eine UV-Farbe verwendet. Die Spezifikation der verwendeten Materialien findet sich in Tabelle 5-12 für die Weißbleche sowie in Tabelle 5-13 für die eingesetzte UV-Farbe.

Tabelle 5-12: Eingesetzte Weißbleche (siehe Abschnitt 2.2.1) bei der Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren mit Zinn- und Ölaufgabe (nach Tabelle 2-5) sowie der verwendeten Passivierung (nach Tabelle 2-4)

Nr.	Weißblech	Zinn-Auflage [g/m ²]	Ölaufgabe	Passivierung
D1	ETP	2,8	DOS	311
D2	ETP	5,6	DOS	311
D3	ECCS	Chrom	DOS	311
D4	CFPA	k.A.	k.A.	505

Tabelle 5-13: Eingesetzte Farbe der Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren mit aufgetragener Schichtdicke (nass), Art des UV-Strahlers und Durchlaufgeschwindigkeit

Nr.	Farbe	Farbauftrag [g/m ²]	UV-Strahler	Durchlaufgeschwindigkeit [m/Min.]
110	Weiß	2 x 4,5	UV-Hg Fa. IST Metz	50

Der Auftrag erfolgt unter Verwendung des Andruckgerätes der Fa. IGT. Zur Erreichung eines akzeptablen Weißgrades sowie zur Gewährleistung einer vollständigen Schichthärtung erfolgt ein doppelter Auftrag der UV-Farbe „nass-auf-trocken“ mit einem Auftragsgewicht von je ~4,5 g/m². Die UV-Härtung der Aufträge erfolgt unter einem UV-Hg-Strahler bei 200 W/cm Leistung und einer Geschwindigkeit von 50 m/Min.

5.4.2 Eingesetzte Vorbehandlungsverfahren

In vorhergehenden Versuchsreihen wurde festgestellt, dass eine Vorbehandlung der Weißbleche mit UV-Strahlung die Haftungseigenschaften der UV-Farbe positiv beeinflussen. Daher soll nun geprüft werden, wie sich die Benetzung bei einem Einsatz verschiedener Vorbehandlungsverfahren auf die Weißbleche verändert. Nachfolgend sind die eingesetzten Vorbehandlungsverfahren aufgeführt, welche bei dieser Versuchsreihe zum Einsatz kommen.

UV-Vorbehandlung

Durch eine Vorbehandlung von Weißblechen mittels Bestrahlung von ultravioletem Licht ist es möglich, die Haftungseigenschaften zu verbessern. Zur Analyse der Wirksamkeit und als Basis für Vergleiche werden verschiedene Strahlungssysteme (UV-Hg, UV-C, UV-LED; siehe Abschnitt 2.3.2) mit unterschiedlichen Peaks im elektromagnetischen Spektrum herangezogen und für die Vorbehandlung der Weißbleche verwendet.

2-Propanol-Reinigung und zusätzlicher UV-Vorbehandlung

Zum Schutz vor mechanischen Einwirkungen in der Herstellung dreiteiliger Metallverpackungen sind die Probenbleche in einem elektrostatischen Beölungsvorgang mit einem dünnen Film aus Dioctylsebacat (DOS) oder Acetyltributylcitrat (ATBC) beschichtet (siehe Tabelle 2-5), mit dem Ziel, die Verarbeitungseigenschaften des Weißblechs zu

verbessern. Diese Ölschicht wird durch eine manuelle Reinigung mit 2-Propanol entfernt. Zusätzlich erfolgt nach der Reinigung eine Vorbehandlung mit einem UV-Hg-Strahler.

AD-Plasma (Atmosphärendruck-Plasma)

Ein weiteres Verfahren zur Reinigung von Oberflächen stellt die Behandlung mit Plasma dar. Um die Wirksamkeit der UV-Vorbehandlung einordnen zu können, wird das AD-Plasmaverfahren (Atmosphärendruck-Plasma) herangezogen. Der Abstand zwischen Plasmaquelle und Weißblech beträgt ~ 5 mm. Die Reinigung erfolgt bei einer Durchlaufgeschwindigkeit von 25 m/Min.

Temperatur

Angelehnt an das thermische Verfahren des Crackens, welches zur Konversion in der Erdölverarbeitung angewandt wird, sollen durch Einwirkung von Temperatur über eine bestimmte Zeit Veränderungen in der Beschaffenheit des auf der Oberfläche der Weißbleche anhaftenden Öls erzielt werden. Die Weißbleche werden vor dem Auftrag bei 200°C für 15 Min. in einen Wärmeschrank gelegt.

Einen Überblick über die angewandten Vorbehandlungsverfahren gibt Tabelle 5-14:

Tabelle 5-14: Übersicht zu den eingesetzten Vorbehandlungsverfahren mit den jeweiligen Versuchsparametern

Vorbehandlungs- verfahren	UV-A [mJ/cm ²]	UV-B [mJ/cm ²]	UV-C [mJ/cm ²]	Durchlauf- geschwindigkeit [m/Min.]	Temperatur [C°]	Dauer [Min.]
Ohne Vorbehandlung	-	-	-	-	-	-
UV-Hg	67	67	21	50	-	-
UV-C	18	0	200	50	-	-
UV-LED	108	103	31	50	-	-
UV-Hg	124	124	39	25	-	-
2-Propanol-Reinigung/ UV-Hg	67	67	21	50	-	-
AD-Plasma	-	-	-	25	-	-
Temperatur	-	-	-	-	190	15

5.4.3 Benetzungseigenschaften

Vor der Durchführung der Vorbehandlungsversuche werden die Benetzungseigenschaften der Weißbleche mittels der Kontaktwinkelmessung ermittelt. Die Ergebnisse der Benetzungseigenschaften sind in Abbildung 5-7 dargestellt:

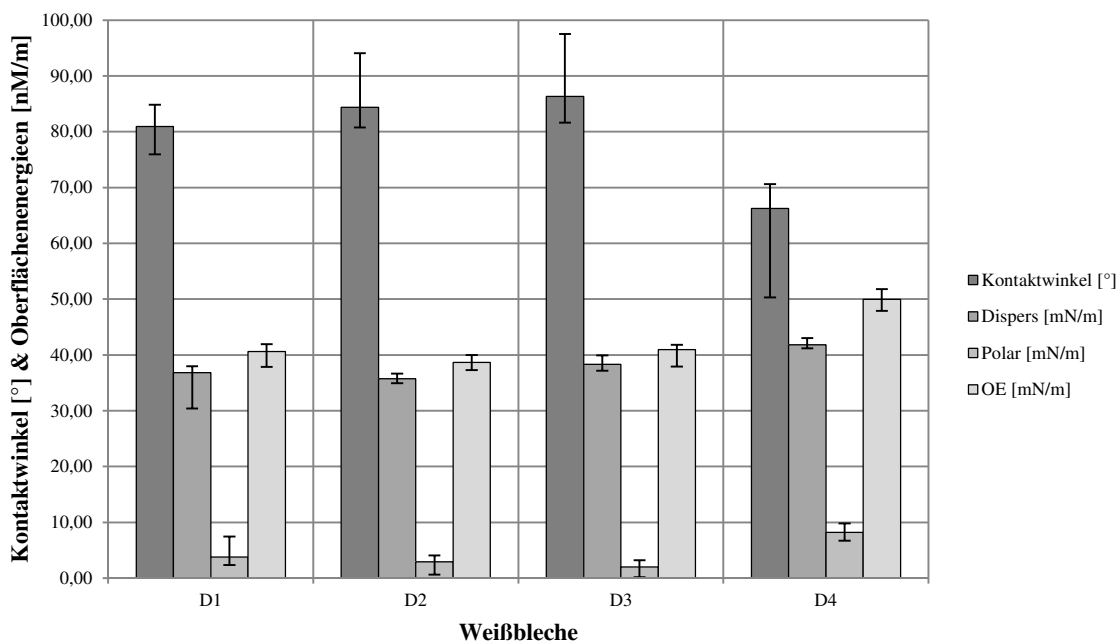


Abbildung 5-7: Benetzungseigenschaften der Weißbleche D1 bis D4

Der Kontaktwinkel liegt bei den Weißblechen D1 (ETP), D2 (ETP) und D3 (ECCS) zwischen 80,95° und 86,31° auf einem annähernd gleichen Niveau, während D4 (CFPA) einen stark verminderten Kontaktwinkel von lediglich 66,25° aufweist.

Ähnlich ist es bei der Oberflächenenergie. D1, D2 und D3 liegen jeweils auf gleichem Niveau. D4 hingegen besitzt eine mit ~10 nN/m höhere Oberflächenenergie. Dies ist im Besonderen dem polaren Anteil geschuldet, welcher im Vergleich zu den Weißblechen D1, D2 und D3 um das Zwei- bis Vierfache erhöht ist.

Die Weißbleche D1 und A13 sowie D2 und A6 sind identisch parametrisiert. Im Vergleich der gemessenen Kontaktwinkel und Oberflächenspannung liegen beide Paarungen auf gleichem Niveau.

5.4.4 Benetzungsveränderungen - Kontaktwinkel

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Kontaktwinkelmessung diskutiert. Dabei gilt grundsätzlich, je geringer der Kontaktwinkel, desto besser die Benetzungseigenschaften (vgl. Abbildung 2-22). Für jedes Weißblech werden hierbei die jeweiligen Kontaktwinkel ohne und mit Vorbehandlung miteinander verglichen und anschließend im Gesamtvergleich betrachtet. Eine Betrachtung der Ergebnisse der Oberflächenenergie sowie der dispersen und polaren Anteile wird in Abschnitt 5.4.5 durchgeführt.

Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D1 (ETP)

Das allgemeine Niveau des Kontaktwinkels auf Weißblech D1 liegt bei $80,95^\circ$. Die Veränderungen der Kontaktwinkel aufgrund der UV-Vorbehandlungen sind marginal. Durch die Reinigung mittels 2-Propanol kann der Kontaktwinkel um $5,55^\circ$ verringert werden. Ein ähnliches Ergebnis wird bei Temperatureinwirkung erzielt, hier liegt die Verringerung bei $7,40^\circ$. Mittels der AD-Plasma-Vorbehandlung wird die mit Abstand stärkste Verringerung des Kontaktwinkels von $39,52^\circ$ erzielt.

In der nachfolgenden Abbildung 5-8 sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D1 aufgeführt:

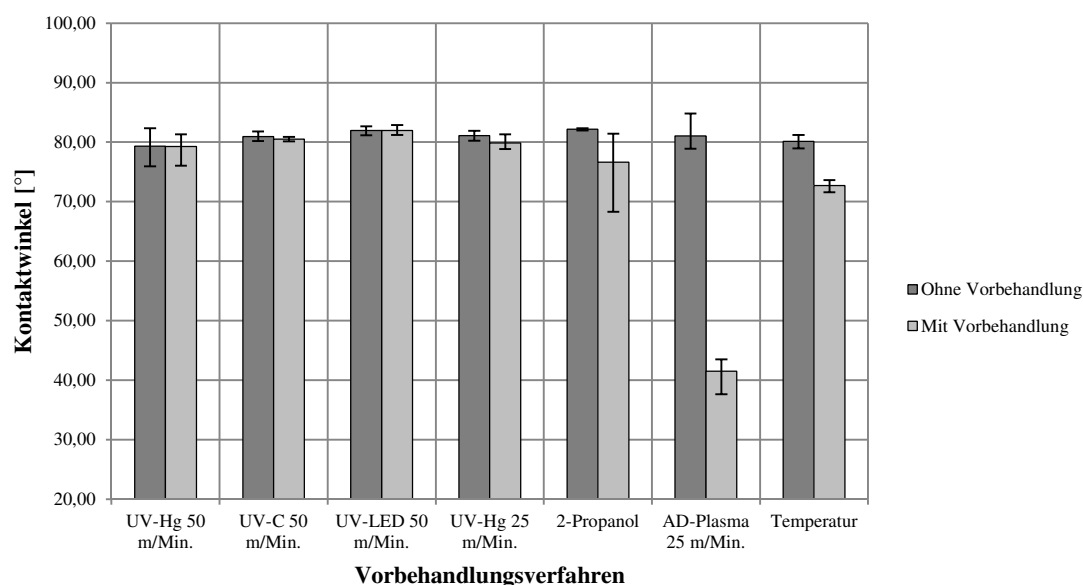


Abbildung 5-8: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D1 (ETP) ohne und mit Vorbehandlungsverfahren

Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D2 (ETP)

Das allgemeine Niveau des Kontaktwinkels auf Weißblech D2 liegt bei $84,37^\circ$. Die Veränderungen der Kontaktwinkel aufgrund der UV-Vorbehandlungen sind marginal. Durch die Reinigung mittels 2-Propanol kann der Kontaktwinkel um $7,34^\circ$ verringert werden. Ein ähnliches Ergebnis wird bei der Temperatureinwirkung erzielt, hier liegt die Verringerung bei $10,10^\circ$. Mittels der AD-Plasma-Vorbehandlung wird die mit Abstand stärkste Verringerung des Kontaktwinkels von $45,75^\circ$ erzielt.

In der nachfolgenden Abbildung 5-9 sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D2 aufgeführt:

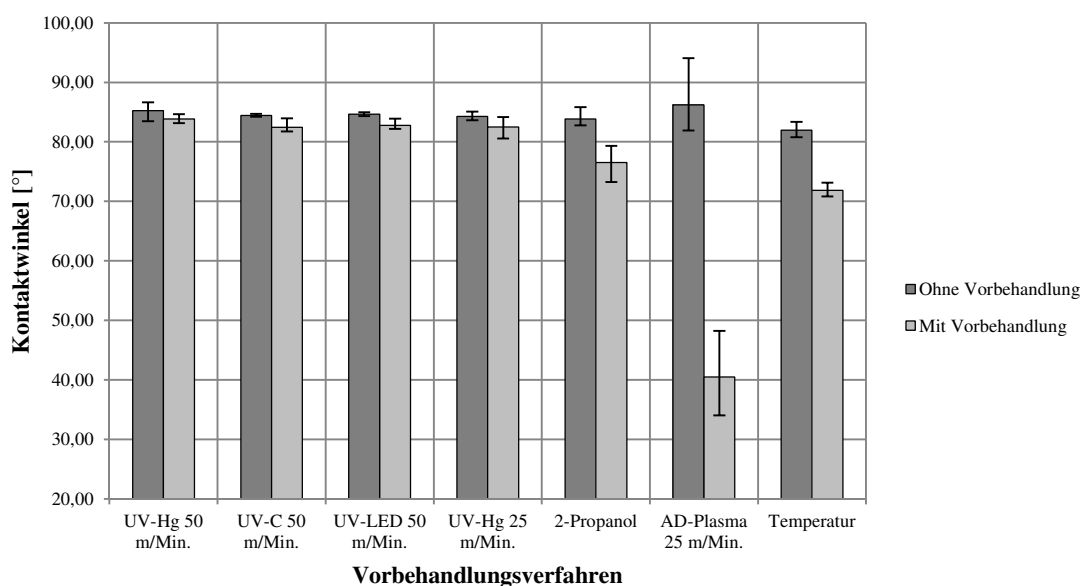


Abbildung 5-9: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D2 (ETP) ohne und mit Vorbehandlungsverfahren

Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D3 (ECCS)

Das allgemeine Niveau des Kontaktwinkels auf dem verchromten Weißblech D3 liegt bei $86,31^\circ$. Die Veränderung der Kontaktwinkel aufgrund der UV-Vorbehandlungen sind ähnlich D1 und D2 marginal. Durch die Reinigung mittels 2-Propanol kann der Kontaktwinkel um $14,19^\circ$ verringert werden. Ein ähnliches Ergebnis wird bei Temperatureinwirkung erzielt, hier liegt die Verringerung bei $3,48^\circ$. Mittels der AD-Plasma-Vorbehandlung wird wieder die mit Abstand stärkste Verringerung des Kontaktwinkels von $45,85^\circ$ erzielt.

In Abbildung 5-10 sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D3 aufgeführt:

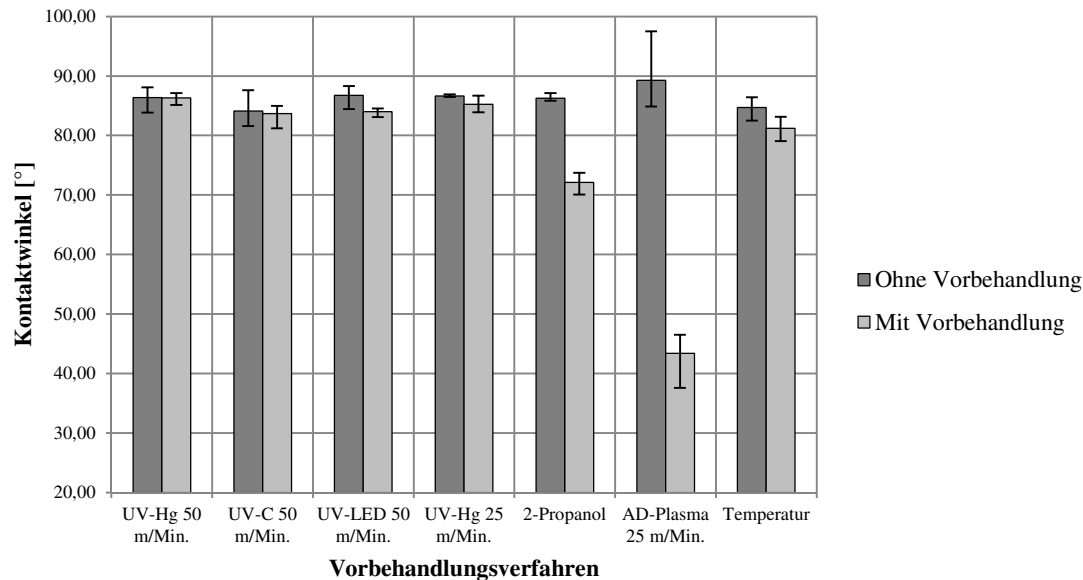


Abbildung 5-10: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D3 (ECCS) ohne und mit Vorbehandlungsverfahren

Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D4 (CFPA)

Das allgemeine Niveau des Kontaktwinkels auf dem Weißblech D4 (CFPA) liegt im Vergleich zu den übrigen Weißblechen mit $66,25^\circ$ bereits sehr niedrig. Die Veränderungen der Kontaktwinkel aufgrund der UV-Vorbehandlungen sind ebenfalls marginal. Auffällig ist, dass beim Einsatz von UV-LED ein Anstieg des Kontaktwinkels um $2,29^\circ$ zu beobachten ist. Durch die Reinigung mittels 2-Propanol kann der Kontaktwinkel um $7,77^\circ$ verringert werden. Ein ähnliches Ergebnis wird bei Temperatureinwirkung erzielt, hier liegt die Verringerung bei $5,93^\circ$. Mittels der AD-Plasma-Vorbehandlung wird die mit Abstand stärkste Verringerung des Kontaktwinkels von $38,33^\circ$ erzielt.

In Abbildung 5-11 sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D4 aufgeführt:

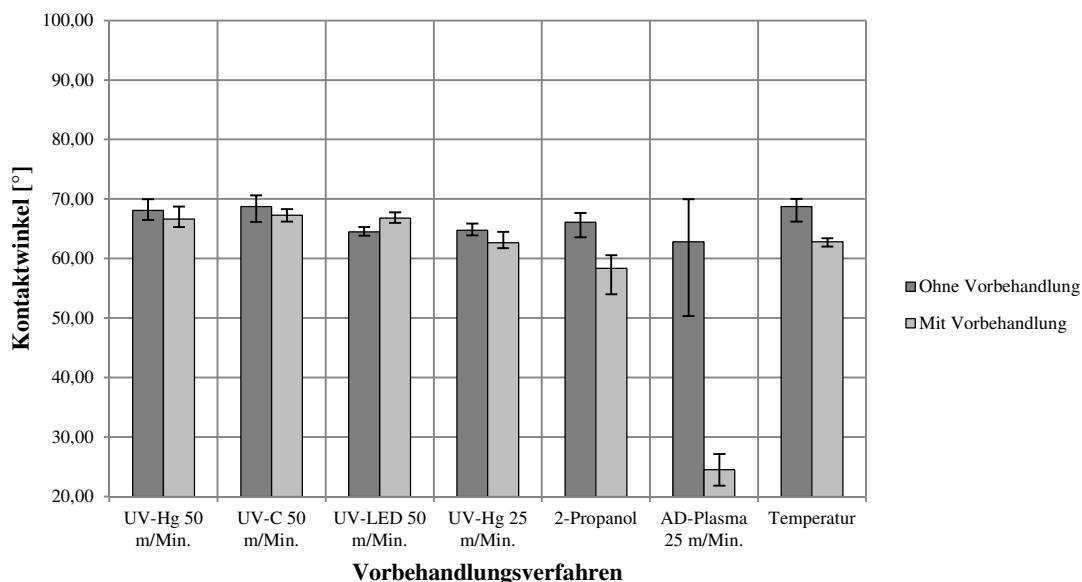


Abbildung 5-11: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Weißblech D4 (CFPA) ohne und mit Vorbehandlungsverfahren

Einfluss des Vorbehandlungsverfahrens auf den Kontaktwinkel

Aus der Betrachtung der Ergebnisse lässt sich schließen, dass die Vorbehandlung mittels AD-Plasma die mit Abstand stärkste Veränderung der Kontaktwinkel hervorruft. Die durchschnittliche relative Abnahme des Kontaktwinkels, unabhängig des verwendeten Weißbleches, beträgt bei Einsatz des AD-Plasmas rund 50 %.

Temperatureinwirkung sowie die 2-Propanol-Reinigung ergeben gleichwertige Resultate. Die relative Veränderung des Kontaktwinkels liegt, in Abhängigkeit vom verwendeten Weißblech, bei beiden Verfahren zwischen 5 % und 15 % und somit deutlich niedriger als bei Anwendung der AD-Plasmas.

Im Vergleich hierzu liegt die hervorgerufene relative Veränderung durch die UV-Vorbehandlungsverfahren bei weniger als 5 %. Bei Betrachtung der Messwerte ist im Besonderen die Veränderung des Kontaktwinkels bei der Verwendung von UV-LED auf Weißblech D4 (CFPA) auffallend, welche eine Veränderung gegensätzlicher Erwartung hervorgerufen hat.

Abbildung 5-12 zeigt die Veränderungen der Kontaktwinkel aufgrund der Einwirkung der Vorbehandlungsverfahren:

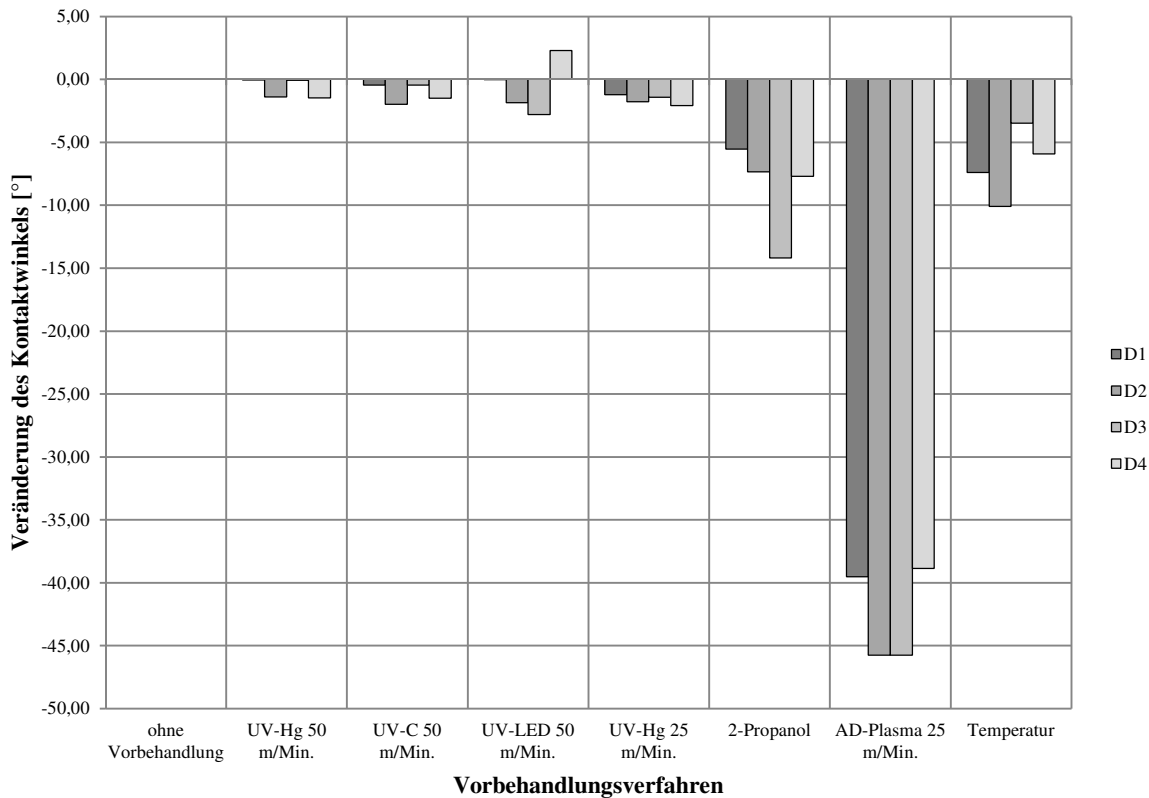


Abbildung 5-12: Veränderung der Kontaktwinkel auf den Weißblechen D1 bis D4 aufgrund der Einwirkung der eingesetzten Vorbehandlungsverfahren

5.4.5 Benetzungsveränderungen - Oberflächenenergie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Oberflächenenergie sowie der jeweiligen dispersen und polaren Anteile betrachtet. Da die Oberflächenenergie (berechnet nach Gleichung (4-1)), bestehend aus der Summe von polarem und dispersem Anteil, indirekt unter Zuhilfenahme des Kontaktwinkels der Testflüssigkeiten gemessen wird, zeichnet sich äquivalent zu den Ergebnissen der Kontaktwinkelveränderung der daraus resultierende Anstieg der Oberflächenenergie ab. Daher wird im Unterschied zu den vorgestellten Ergebnissen der Kontaktwinkel auf eine Einzelergebnisdarstellung verzichtet und der Schwerpunkt auf die durch die Vorbehandlungsverfahren erzielten relativen Veränderungen gelegt.

Durch Anwendung des AD-Plasmas lässt sich über die Gesamtheit der Weißbleche hinweg ein Anstieg der Oberflächenenergie von 20 mN/m bis 25 mN/m verzeichnen. Die negative Veränderung der Oberflächenenergie auf Weißblech D4 (CFPA) bei Anwendung des UV-LED Strahlers spiegelt die bereits in der Kontaktwinkelmessung gegensätzlich aufgetretene Erscheinung wieder. Eine weitere aufgetretene Anomalie stellt die Abnahme der Oberflächenenergie von 2 mN/m bei der Vorbehandlung von D3 (ECCS) mittels Temperatur dar. Bei einer Anwendung von UV-Strahlern zum Zweck der Vorbehandlung lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse eine marginale Veränderung in der Oberflächenenergie beobachten. Die erzielten Zuwächse bei Anwendung von 2-Propanol, Temperatureinwirkung und UV-Strahler sind gering und zeigen einen Anstieg zwischen 0 mN/m und 6 mN/m. In der Abbildung 5-13 sind die Veränderungen der Oberflächenenergien aufgeführt:

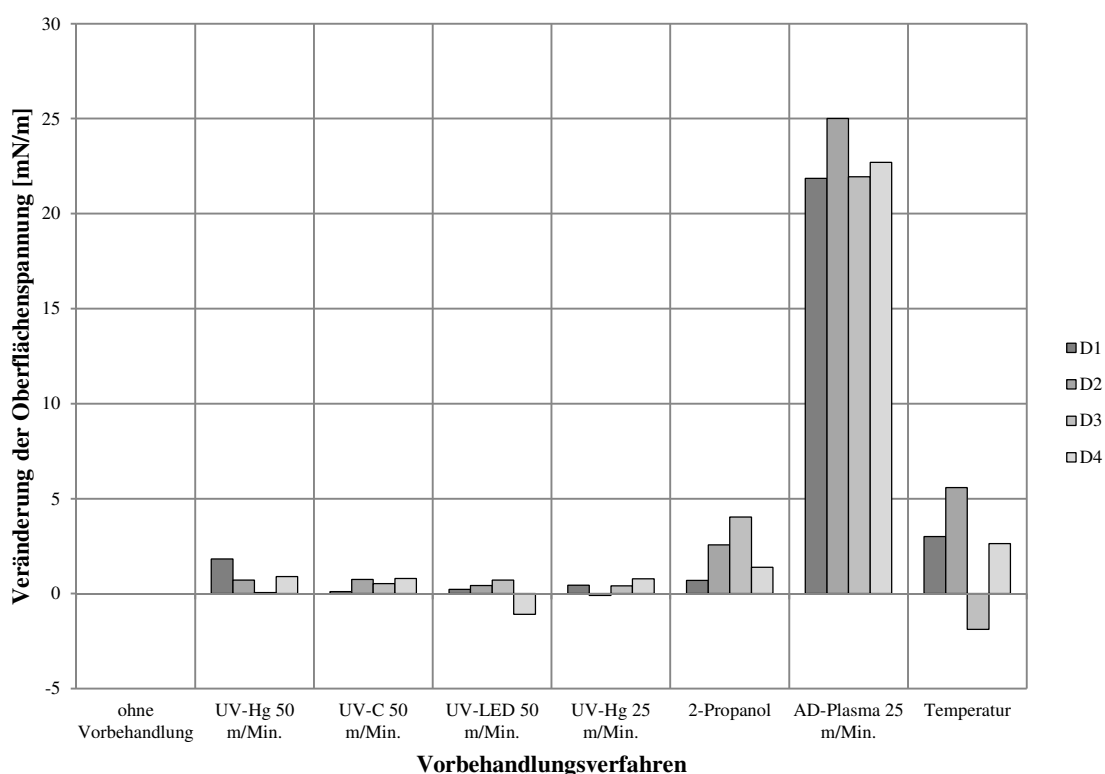


Abbildung 5-13: Veränderung der Oberflächenenergie auf den Weißblechen D1 bis D4 aufgrund der Einwirkung der eingesetzten Vorbehandlungsverfahren

Abbildung 5-13 zeigt, dass ein durch eine Vorbehandlung eingebrachter Energieeintrag zu einer Erhöhung der Oberflächenenergie führt.

Polarer Anteil

Die bewirkten Veränderungen im polaren Anteil, die durch die Vorbehandlung mit UV-Strahlern erzielt werden, sind vergleichsweise gering und schwanken mit Veränderungen von ± 1 mN/m um den Nullpunkt. Durch die Reinigung mittels 2-Propanol kann der polare Anteil bei den beiden Weißblechen D1 und D2 um 2,7 mN/m erhöht werden. Bei den Weißblechen D3 und D4 wird der polare Anteil um etwa 5,5 mN/m zum Vorniveau erhöht. Ähnliche Ergebnisse können durch die Temperatureinwirkung erzielt werden. Hier ist eine Veränderung von etwa 3 mN/m erreicht. Mittels der AD-Plasma-Vorbehandlung wird die mit Abstand stärkste Veränderung des polaren Anteils um etwa 20 mN/m erreicht.

In der Abbildung 5-14 sind die Veränderungen des polaren Anteils aufgeführt.

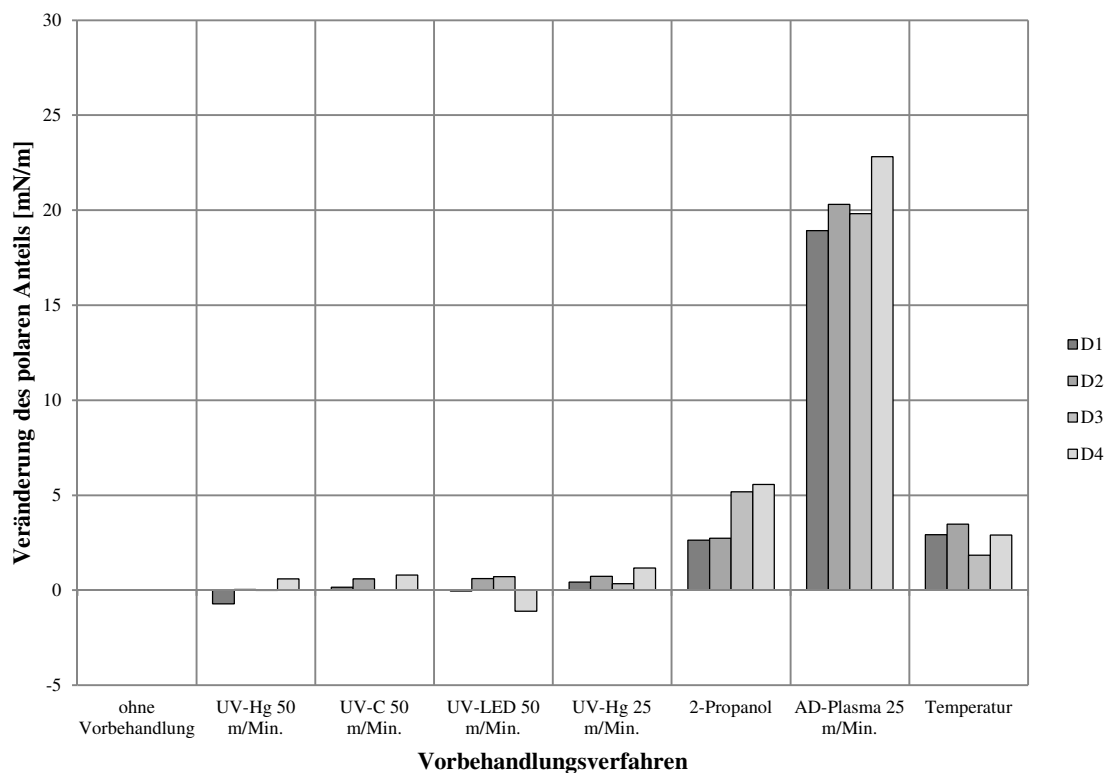


Abbildung 5-14: Veränderung des polaren Anteils auf den Weißblechen D1 bis D4 aufgrund der Einwirkung der eingesetzten Vorbehandlungsverfahren

Abbildung 5-14 zeigt, dass ein durch eine Vorbehandlung eingebrachter Energieeintrag zu einer Erhöhung der polaren Anteile der Oberflächenenergie führt.

Disperser Anteil

Die Veränderungen, die durch die Vorbehandlung mittels UV-Strahlung erzielt werden, sind nahezu nicht vorhanden. Demgegenüber stehen die Zuwächse zwischen 2 mN/m und 5 mN/m aufgrund der Vorbehandlung des AD-Plasmas. Auffallend dabei ist, dass diese Vorbehandlung auf Weißblech D4 keinerlei Auswirkungen besitzt. Gegenläufig zu dieser Entwicklung bewirkt die Reinigung mittels 2-Propanol eine Verringerung des dispersen Anteils zwischen 0 mN/m und 4 mN/m. Ebenso konträr sind die Auswirkungen aufgrund von Temperatureinwirkung, welche bei Weißblech D2 einen Anstieg von 2 mN/m und bei Weißblech D3 eine Verringerung um knapp 4 mN/m auslösen, welche auf die Absenkung der Oberflächenenergie zurückgeht.

In Abbildung 5-15 sind die Veränderungen des dispersen Anteils aufgeführt:

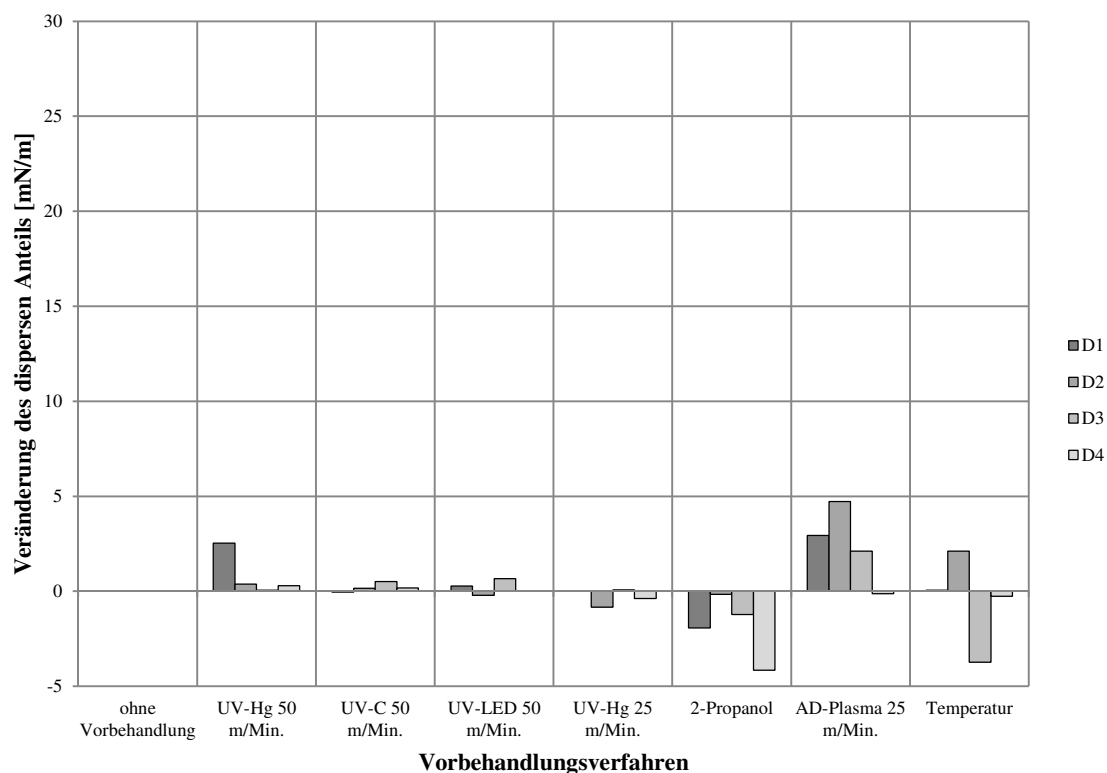


Abbildung 5-15: Veränderung des dispersen Anteils auf den Weißblechen D1 bis D4 aufgrund der Einwirkung der eingesetzten Vorbehandlungsverfahren

Abbildung 5-15 zeigt, dass ein durch eine Vorbehandlung eingebrachter Energieeintrag anscheinend kaum einen Einfluss auf die dispersen Anteile der Oberflächenenergie besitzt.

5.4.6 Gitterschnitttest

Zur Anwendung kommt der Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 (siehe Abschnitt 4.1.2) in Kombination mit dem Tesa-Test (siehe Abschnitt 4.1.3) in einer ersten Versuchsreihe unmittelbar nach dem Auftrag und einer zweiten Versuchsreihe 24 Std. nach dem Auftrag. Zur Beurteilung der Ergebnisse wird die in Tabelle 4-1 aufgeführte Bewertungsskala des Gitterschnitttests benutzt.

Der Gitterschnitttest mit anschließendem Tesa-Test wird zweimal durchgeführt. Zum einen unmittelbar nach dem Auftrag, zum zweiten 24 Std. nach dem Auftrag. Im Vergleich der Weißbleche weist D4 (CFPA) die mit Abstand stärksten Haftungseigenschaften (Gitterschnitt-Kennwert: 0) bei unmittelbar durchgeführtem Gitterschnitt auf. Lediglich bei UV-LED, AD-Plasma und Temperatureinwirkung wird ein Kennwert von 1 erzielt. Im Vergleich der Vorbehandlungen kann bei unmittelbar durchgeführtem Gitterschnitt keine der angewandten Methoden ein gutes Ergebnis erzielen. Die beste Haftung wird mit dem UV-C-Strahler erreicht, welcher im kurzwelligen Bereich die stärksten Strahlungswerte emittiert.

Die Ergebnisse der Gitterschnitt-Kennwerte unmittelbar nach dem Auftrag sind in Abbildung 5-16 aufgeführt:

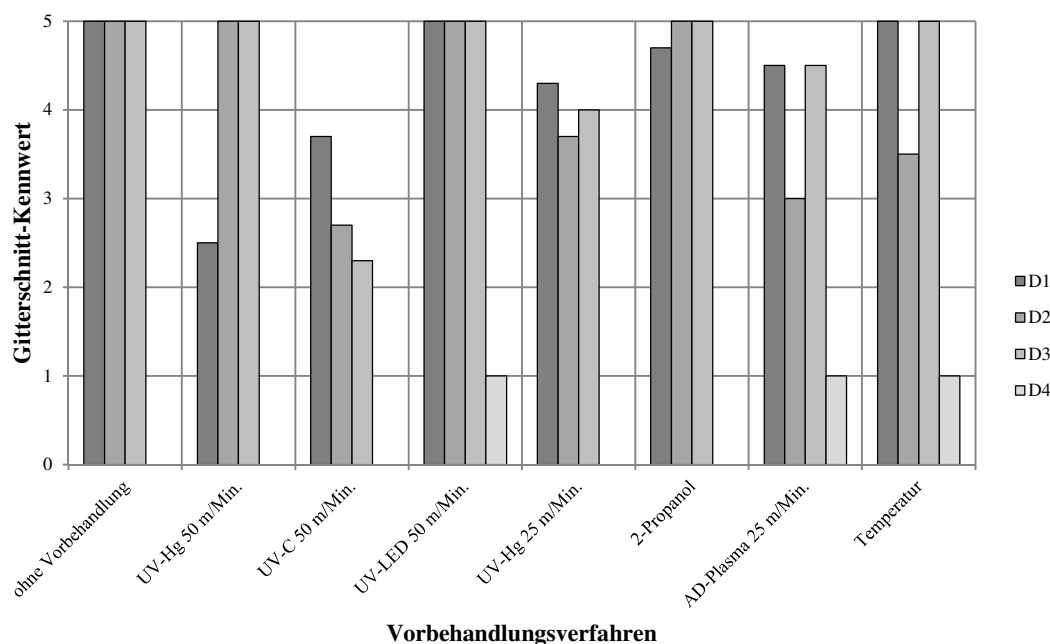


Abbildung 5-16: Gitterschnitt-Kennwerte unmittelbar nach dem Auftrag

Die zweite Gitterschnitttest-Versuchsreihe zeigt deutlich, dass sich weniger Farbe von den Proben löst. Die Gitterschnitt-Kennwerte liegen in den meisten Fällen bei 0 (siehe Abbildung 5-17), was keinerlei Farbablösung bedeutet. Die UV-Farbe haftet auf allen Weißblechen durchgehend gut. Erhöhte Kennwerte sind zu beobachten, wenn keine Vorbehandlung durchgeführt wird sowie, und das ist überraschend, bei einer Vorbehandlung mit AD-Plasma. Überraschend ist das Ergebnis deshalb, da die Vorbehandlung mit AD-Plasma zur mit Abstand stärksten Veränderung des Kontaktwinkels führt. Da dieses Ergebnis derzeit nicht zu erklären ist, werden von den Weißblechen REM-Aufnahmen aufgenommen, um auf eventuelle Versprödungen Rückschlüsse ziehen zu können.

Die Ergebnisse der Gitterschnitt-Kennwerte 24 Std. nach der Applikation sind in Abbildung 5-17 aufgeführt:

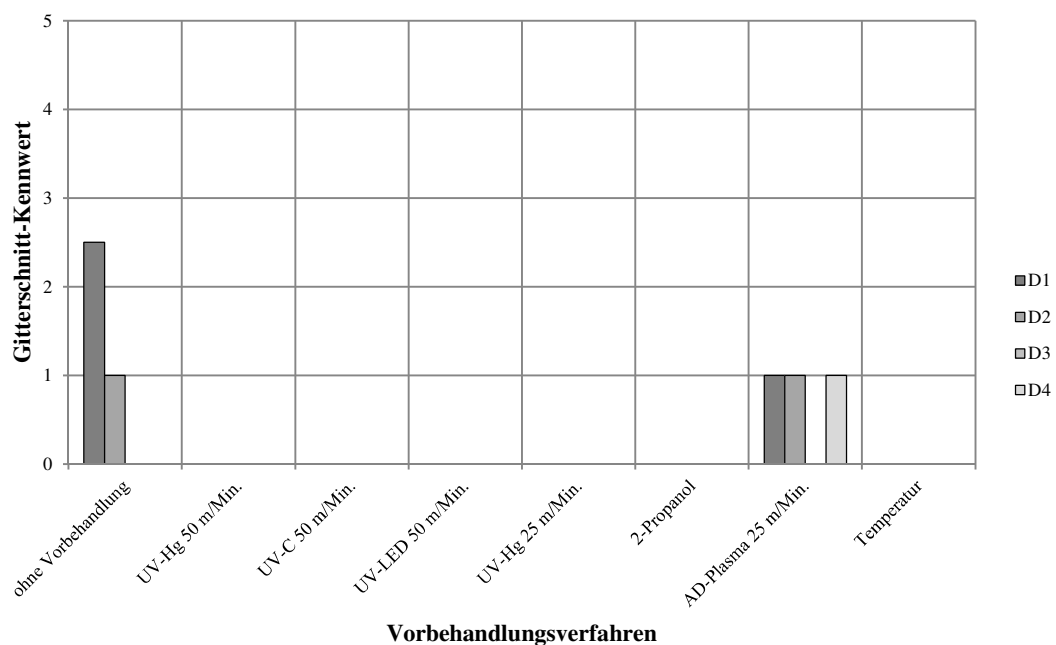


Abbildung 5-17: Gitterschnitt-Kennwerte 24 Std. nach dem Auftrag

5.4.7 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen

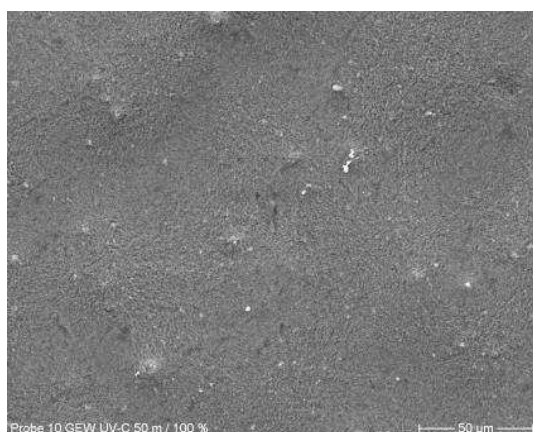
Von den Weißblechproben wurden Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM) mit 400-facher, 1.000-facher und 3.000-facher Vergrößerung angefertigt. Zudem sind die Aufnahmen mittels Rückstreuелеlektronenkontrast und Sekundärelektronenkontrast durchgeführt worden. In Tabelle 5-15 ist die Übersicht zu den Messungen der REM-Aufnahmen dargestellt. Von den REM-Aufnahmen werden lediglich die Sekundärelektronenkontrast-Aufnahmen bewertet. Zur Ergebnisdarstellung werden im Folgenden jeweils nur exemplarische Aufnahmen von Proben mit den Vorbehandlungsverfahren UV-C und AD-Plasma aufgeführt. Die Aufnahmen sind vollständig im Anhang A.2 dargestellt.

Tabelle 5-15: Übersicht zu den Messungen der REM-Aufnahmen

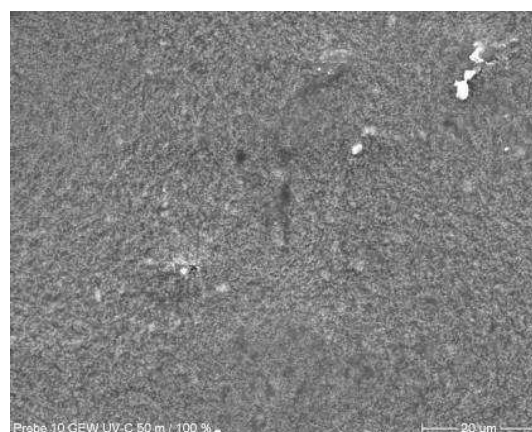
Nr.	Weißblech	Vorbehandlungsverfahren	Spezifikation
D1	ETP	Keine Aufnahmen vorhanden	
D2	ETP	Ohne Vorbehandlung	-
D2	ETP	UV-Hg	50 m/ 200 W
D2	ETP	UV-C	50 m/ 100 %
D2	ETP	UV-LED	50 m/ 100 %
D2	ETP	UV-HG	25 m/ 200 W
D2	ETP	IPA & UV-Hg	50 m/ 200 W
D2	ETP	AD-Plasma	25 m/ Min.
D2	ETP	Temperatureinwirkung	15 Min./ 190°C
D3	ECCS	Ohne Vorbehandlung	-
D3	ECCS	UV-Hg	50 m/ 200 W
D3	ECCS	UV-C	50 m/ 100 %
D3	ECCS	UV-LED	50 m/ 100 %
D3	ECCS	UV-HG	25 m/ 200 W
D3	ECCS	IPA & UV-Hg	50 m/ 200 W
D3	ECCS	AD-Plasma	25 m/ Min.
D3	ECCS	Temperatureinwirkung	15 Min./ 190°C
D4	CFPA	Ohne Vorbehandlung	-
D4	CFPA	UV-Hg	50 m/ 200 W
D4	CFPA	UV-C	50 m/ 100 %
D4	CFPA	UV-LED	50 m/ 100 %
D4	CFPA	UV-HG	25 m/ 200 W
D4	CFPA	IPA & UV-Hg	50 m/ 200 W
D4	CFPA	AD-Plasma	25 m/ Min.
D4	CFPA	Temperatureinwirkung	15 Min./ 190°C

Ergebnisse der REM-Aufnahmen der Weißblechproben D2 (ETP)

Der Gesamtvergleich der Aufnahmen der Weißblechproben D2 zeigt, dass eine homogene Farbschicht mit einer UV-C Vorbehandlung erzeugt wird (siehe Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19). Unterdurchschnittliche Ergebnisse werden bei Verwendung des UV-Hg-Strahlers erzielt. Im Hinblick auf die Topologie der Oberfläche lassen sich Unterschiede zwischen den Proben UV-Hg, UV-LED und AD-Plasma erkennen. Während bei den mit UV-LED und Plasma vorbehandelten Probesubstraten eine Rissbildung festgestellt werden kann, welche in ihrer Ausprägung tendenziell auf der AD-Plasma-Probe stärker ausgeprägt ist (siehe Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21), zeigt die Farbschicht der mit UV-Hg (mit 25 m/Min.) vorbehandelten Probe eine mit Kratern durchzogene Oberfläche.



**Abbildung 5-18: D2 ETP; GEW UV-C Strahler;
400-fach SE**



**Abbildung 5-19: D2 ETP; GEW UV-C Strahler;
1.000-fach SE**

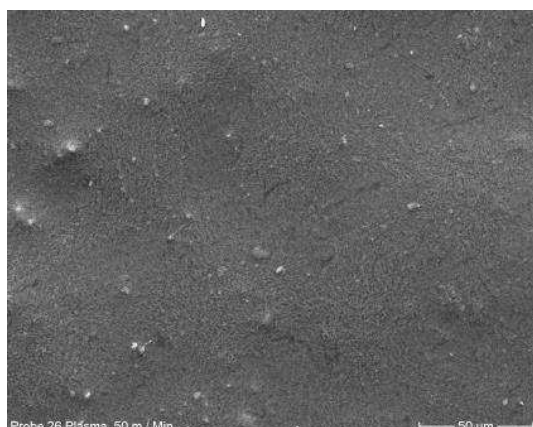
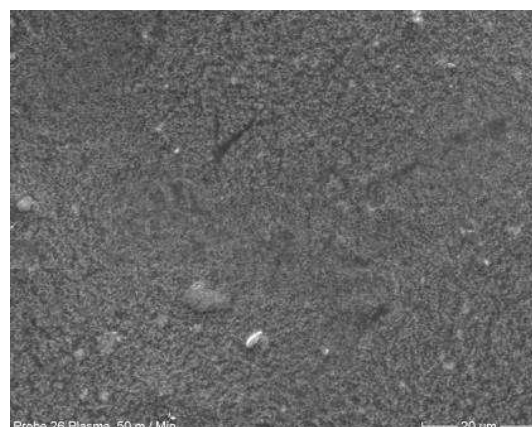


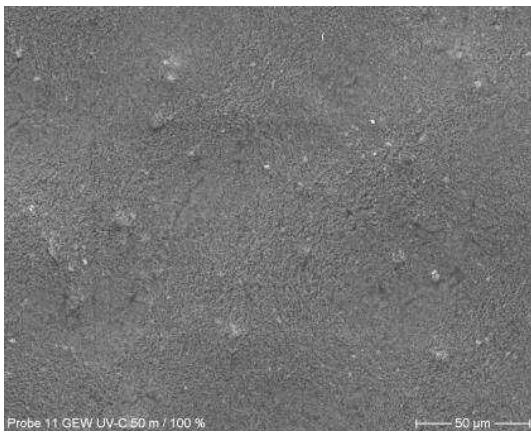
Abbildung 5-20: D2 ETP; AD-Plasma; 400-fach SE



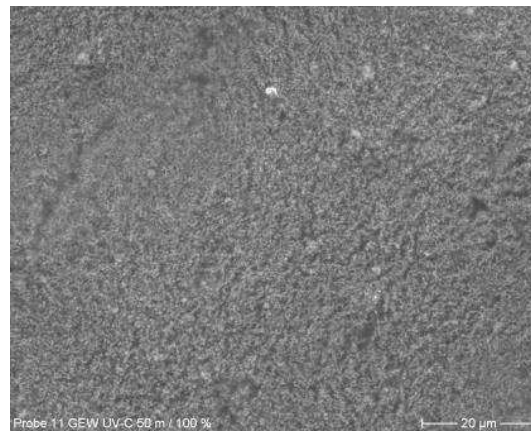
**Abbildung 5-21: D2 ETP; AD-Plasma; 1.000-fach
SE**

Ergebnisse der REM-Aufnahmen der Weißblechproben D3 (ECCS)

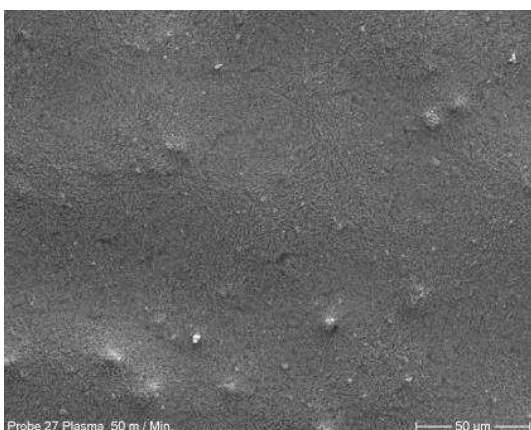
Die REM-Aufnahmen von Weißblech D3 (ECCS) zeigen, wie bereits die Aufnahmen des Weißbleches ETP, dass eine homogene Farbschicht bei einer Vorbehandlung mit UV-C erzeugt werden kann (siehe Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23). Unterdurchschnittliche Ergebnisse werden bei Verwendung des UV-Hg- sowie des UV-LED-Strahlers erzielt. Dabei ist eine hohe Dichte an Kratern und Rissen auf der Oberfläche festzustellen. Im Vergleich hierzu zeigt die AD-Plasma-Weißblechprobe kleinere Risse in der Oberfläche der aufgetragenen Farbe (siehe Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25). Auffallend bei der Betrachtung der durch Temperatur vorbehandelten Proben sind die hohe Dichte an sichtbaren Pigmenten sowie die inhomogene Topologie der Farboberfläche.



**Abbildung 5-22: D3 ECCS; GEW UV-C Strahler;
400-fach SE**



**Abbildung 5-23: D3 ECCS; GEW UV-C Strahler;
1.000-fach**



**Abbildung 5-24: D3 ECCS; AD-Plasma; 400-fach
SE**



**Abbildung 5-25: D3 ECCS; AD-Plasma; 1.000-fach
SE**

Ergebnisse der REM-Aufnahmen der Weißblechproben D4 (CFPA)

Die Auswertung der Probebleche des Weißbleches D4 (CFPA) zeigt ein analoges Ergebnis zu den Aufnahmen der Weißbleche D2 und D3. Das mit UV-C vorbehandelte Weißblech zeigt eine sehr homogene Oberfläche (siehe Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27). Eine vergleichbare Oberflächenqualität ist ebenfalls bei der mittels UV-Hg-Strahler vorbehandelten Probe feststellbar. Ein unterdurchschnittliches Ergebnis wird bei Verwendung der Plasma-Vorbehandlung erzielt, welche eine hohe Dichte an kraterartigen Vertiefungen aufweist (siehe Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29). Im Gesamtvergleich der Weißbleche ist festzustellen, dass auf Weißblech D4 weniger Negativeffekte wie Riss- und Kraterbildung auftreten.

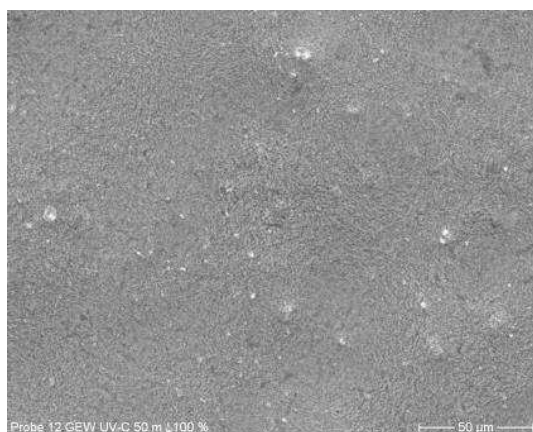


Abbildung 5-26: D4 CFPA; GEW UV-C Strahler; 400-fach SE

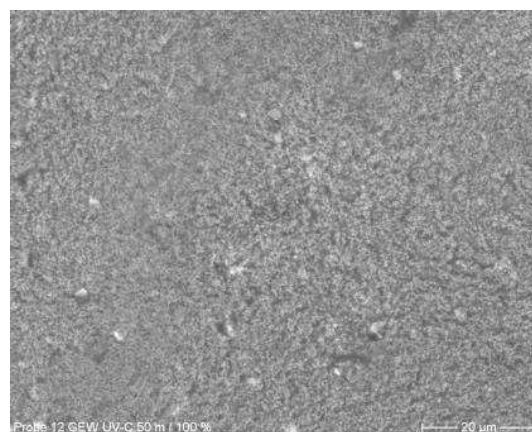


Abbildung 5-27: D4 CFPA; GEW UV-C Strahler; 1.000-fach SE

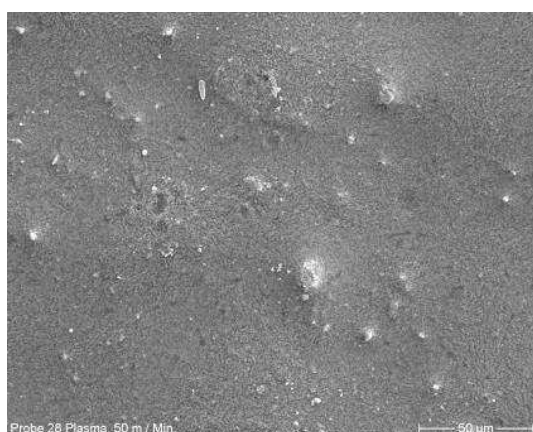


Abbildung 5-28: D4 CFPA; AD-Plasma; 400-fach SE

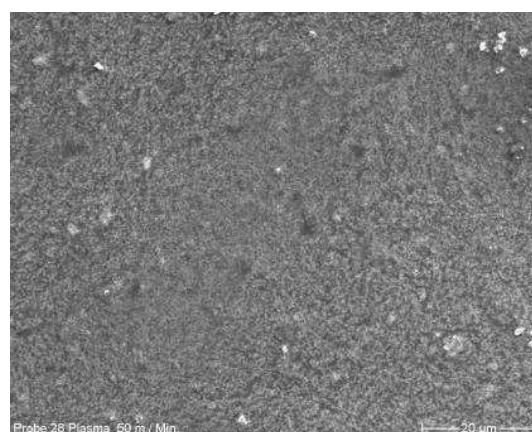


Abbildung 5-29: D4 CFPA; AD-Plasma; 1.000-fach SE

5.5 Excimer-Vorbehandlung

Im vorhergehenden Abschnitt konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag durch eine Vorbehandlung und verbesserten Benetzungseigenschaften (Zunahme der Oberflächenenergie und Zunahme der polaren Anteile) auf Weißblechsubstraten besteht. Darauf aufbauend wird nun geprüft, ob eine Vorbehandlung mittels Excimer-Strahler, mit einem Peak im kurzwelligen V-UV-Spektrum von 172 nm, zu einer stärkeren Kontaktwinkelveränderung führt. Weiterführend soll eine mögliche Korrelation zwischen der Kontaktwinkelveränderung und den Haftungseigenschaften der UV-Farbe anhand des Gitterschnitttests untersucht werden. Um die Wirkungsweise der UV-Vorbehandlung besser verstehen zu können, werden zudem XPS-Analysen der Weißbleche ohne und mit Excimer-Vorbehandlung durchgeführt, um so Rückschlüsse auf stoffliche Veränderungen auf der Weißblechoberfläche ziehen zu können.

5.5.1 Materialien und Auftrag

Die zum Einsatz kommenden Weißbleche sind in der Tabelle 5-16 aufgeführt. Neben verzinnnten (ETP) und verchromten (ECCS) Weißblechen werden zwei weitere Varianten von CFPA-Weißblechen mit den Kennungen CFPA 587 und CFPA 643 eingesetzt.

Tabelle 5-16: Eingesetzte Weißbleche (siehe Abschnitt 2.2.1) der Untersuchung der Excimer-Vorbehandlung mit Zinn- und Ölaufage (nach Tabelle 2-5) sowie der verwendeten Passivierung (nach Tabelle 2-4); Passivierungen auf CFPA-Weißblechen sind unbekannt

Nr.	Weißblech	Zinn-Auflage [g/m ⁻¹]	Ölaufage	Passivierung
E1	ETP	2,8	DOS	311
E2	ECCS	Chrom	DOS	311
E3	CFPA 587	k.A.	k.A.	(587)
E4	CFPA 643	k.A.	k.A.	(643)

Bei der zum Einsatz kommenden Farbe handelt es sich um die bereits in Abschnitt 5.2 Farbentwicklung verwendete Farbe 110 der Fa. ZellerGmelin. Im Unterschied zu den vorangegangenen Untersuchungen wird hier lediglich ein einmaliger Farbauftrag von ~4,5 g/m² aufgetragen. Das für diesen Versuch verwendete Andruckgerät ist unbekannt.

Tabelle 5-17: Eingesetzte Farbe der Untersuchung der Excimer-Vorbehandlung mit aufgetragener Schichtdicke (nass), Art des UV-Strahlers und Durchlaufgeschwindigkeit

Nr.	Farbe	Farbauftrag [g/m ²]	UV-Strahler	Durchlaufgeschwindigkeit [m/Min.]
110	Weiß	4,5	UV-Hg Fa. IST Metz	50

5.5.2 Eingesetzte Vorbehandlungsverfahren: Excimer-Strahler

Zur Vorbehandlung wird ein hoch energetischer Xe-Excimer-Strahler der Fa. IOT - Innovative Oberflächentechnologien GmbH verwendet. Abbildung 5-30 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Excimer-Strahlers schematisch beschrieben.

Excimer-Strahler (**Excited Dimer**) emittieren quasi-monochromatische, inkohärente Wellen mit 172 nm. Aufgrund von Elektronenstößen, werden die Xe-Atome entweder ionisiert (5-1) oder angeregt (5-2) [Kaßmann 2014, Trampert 2008].

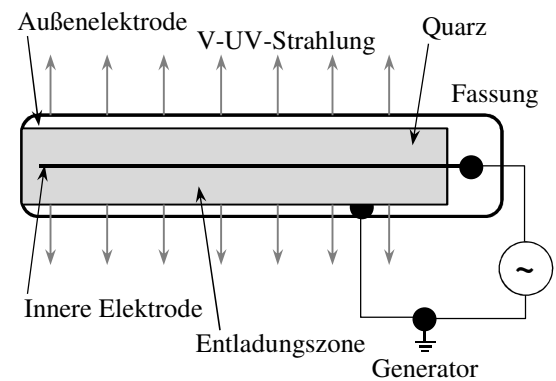
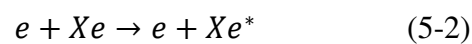
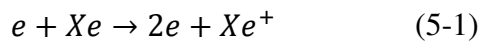


Abbildung 5-30: Prinzipieller Aufbau eines Excimer-Strahlers nach [Mehnert 2017]

Trifft das angeregte Teilchen Xe^* auf zwei weitere neutral geladene Xe -Teilchen, wird der Excimer Xe_2^* gebildet (5-3). Das übrige neutrale Xe -Teilchen ist zur weiteren Impulserhaltung notwendig [Mehnert 2017, Trampert 2008].



Das metastabile Xe_2^* Excimer emittiert Photonen mit 172 nm und zerfällt wieder in zwei Xe -Atome (5-4) [Mehnert 2017].



5.5.3 Benetzungseigenschaften

In einer Eingangsmessung werden die Benetzungseigenschaften der Weißbleche ermittelt (siehe Abbildung 5-31). Das allgemeine Niveau der Kontaktwinkel liegt bei Weißblech E1 (ETP: $79,90^\circ$) und bei Weißblech E2 (ECCS: $79,00^\circ$) bei $\sim 80^\circ$, während bei den Weißblechvarianten CFPA (E3, CFPA 587: $58,50^\circ$; E4, CFPA 643: $60,08^\circ$), wie schon in Abschnitt 5.4.3 erkennbar, geringere Kontaktwinkel von $\sim 60^\circ$ vorliegen. Analog verhält es sich zum polaren Anteil der Oberflächenenergie. Hierbei weisen die CFPA-Varianten höhere Werte (E3, CFPA 587: $12,04 \text{ mN/m}$; E4, CFPA 643: $8,11 \text{ mN/m}$) im Gegensatz zu E1 (ETP: $3,88 \text{ mN/m}$) und E2 (ECCS: $2,66 \text{ mN/m}$) auf.

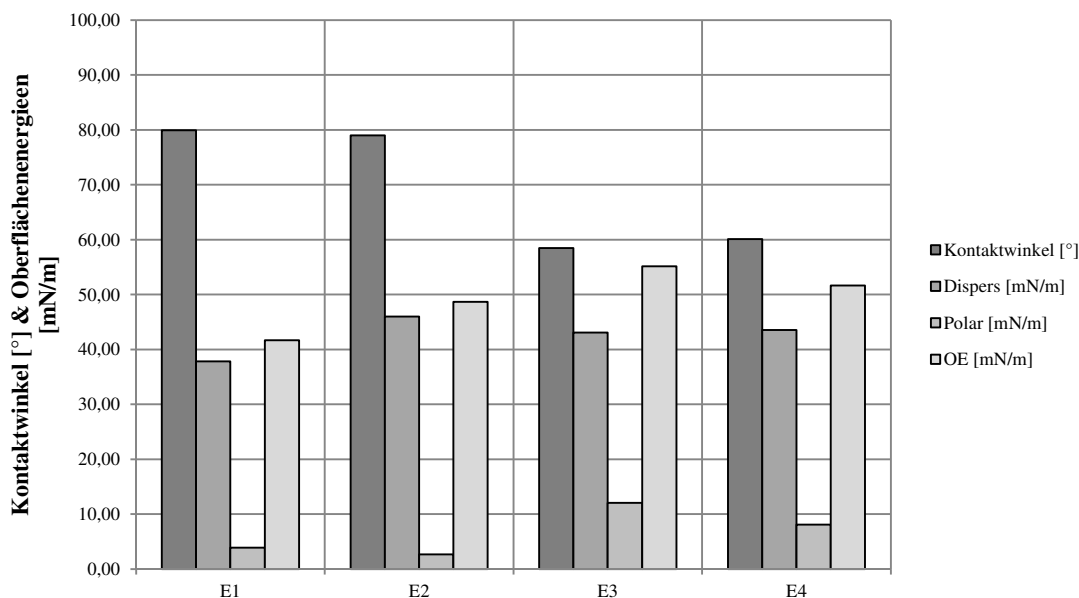


Abbildung 5-31: Benetzungseigenschaften der Weißbleche E1 bis E4

5.5.4 Benetzungsveränderungen

Um weitere Rückschlüsse auf die Wirkung der Excimer-Strahlung ziehen zu können, wird die Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung der Excimer-Strahlung auf die Benetzungseigenschaften der vier Weißblechproben untersucht. Das Experiment ist so gestaltet, dass nach Bestrahlungsintervallen von je einer Sekunde jeweils eine Kontaktwinkelmessung durchgeführt wird. Die zwischen den Messintervallen aufgetretene Vorbereitungszeit betrug ca. 3 Min.. Die Spannweite der Bestrahlungsintervalle liegt bei 0 bis 10 Sek. und umfasst je Weißblech elf Messungen. Für das Bestrahlungsintervall mit 0 Sek.

wurde keine Vorbehandlung durchgeführt. Zusätzlich wird eine zwölfte Messung mit einer Bestrahlungsdauer von 30 Sek. durchgeführt.

Benetzungsveränderungen des Kontaktwinkels

Die Messungen der Kontaktwinkel zeigen eine deutliche Veränderung aufgrund der Excimer Bestrahlung. Auf allen Weißblechen konnten die Kontaktwinkel reduziert werden. Der stärkste Einfluss ist auf Weißblech E4 (CFPA 643) zu verzeichnen (Abbildung 5-35). Innerhalb des 10-Sekunden Intervalls reduziert sich der Kontaktwinkel von $77,27^\circ$ auf $21,84^\circ$. Einen Hinweis auf eine abgeschlossene Approximation der Kontaktwinkelmanipulation gibt die Messung des 30-Sekunden Intervalls, bei der sich ein Kontaktwinkel von $24,80^\circ$ zeigt. Auf Weißblech E2 (ECCS) ist der Einfluss relativ gering (Abbildung 5-33). Der Kontaktwinkel hat sich von $86,33^\circ$ nach 10 Sek. Vorbehandlung auf $57,35^\circ$ reduziert. Auffällig ist, dass auf Weißblech E3 (CFPA 587) bis Sekunde 3 erhöhte Kontaktwinkel entstehen und die anschließende Reduzierung in sehr kleinen Schritten erfolgt (Abbildung 5-34). Der anfängliche Anstieg des Kontaktwinkellevels ist derzeit nicht erklärbar. Aufgrund einer zu hohen Spreitung der Messflüssigkeit nach 30 Sekunden Vorbehandlung war eine Kontaktwinkelmessung auf Weißblech E3 (CFPA 587) nicht möglich.

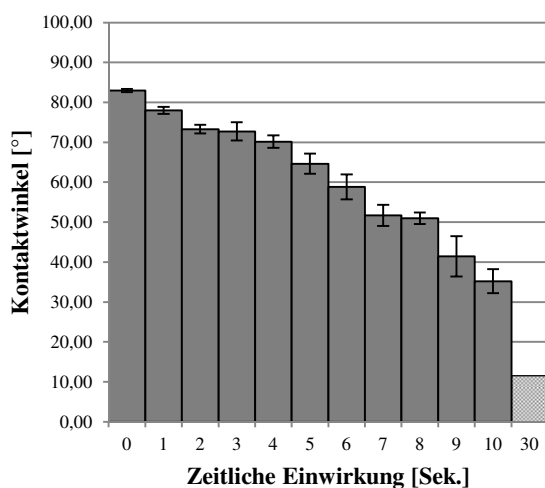


Abbildung 5-32: Veränderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E1 (ETP)

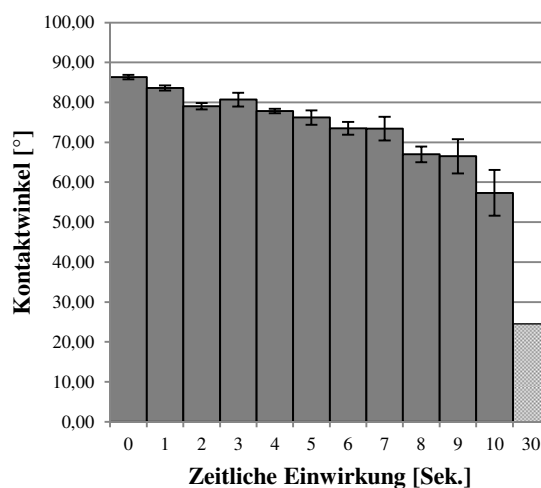


Abbildung 5-33: Veränderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E2 (ECCS)

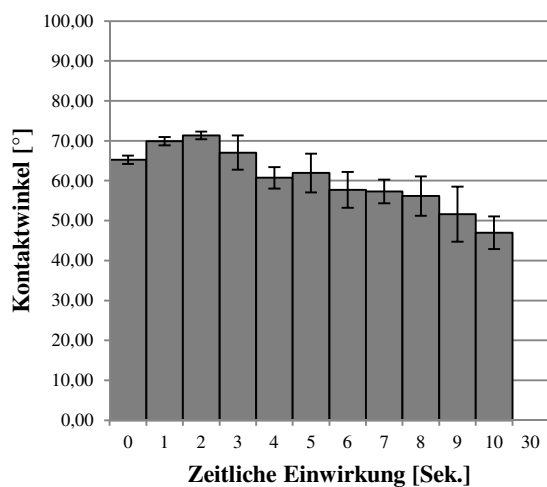


Abbildung 5-34: Veränderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E3 (CFPA 587)

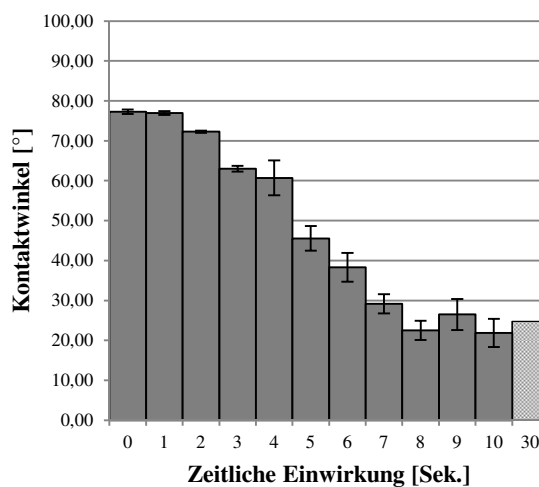


Abbildung 5-35: Veränderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E4 (CFPA 643)

Benetzungsveränderungen der Oberflächenenergie

Die folgenden Abbildungen zeigen die durch den Excimer-Strahler bewirkten Veränderungen der Oberflächenenergie in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung:

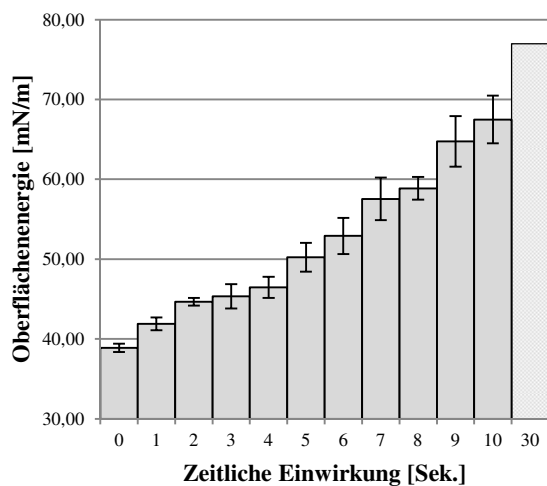


Abbildung 5-36: Veränderung der Oberflächenenergie in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E1 (ETP)

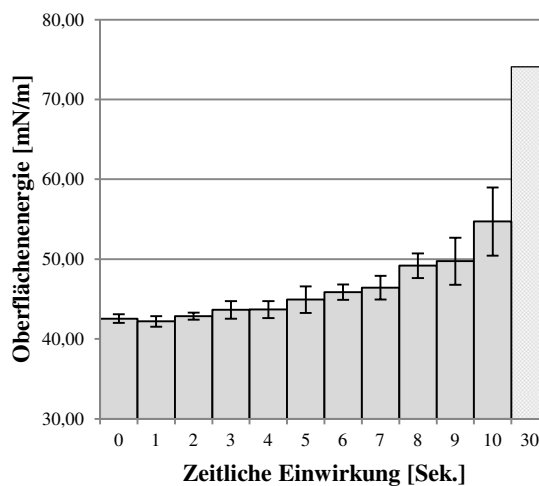


Abbildung 5-37: Veränderung der Oberflächenenergie in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E2 (ECCS)

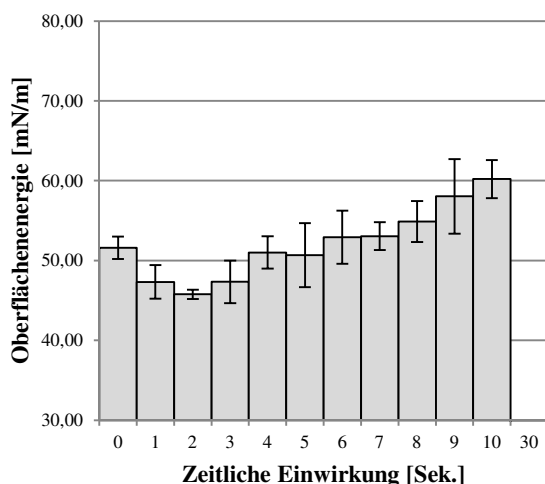


Abbildung 5-38: Veränderung der Oberflächenenergie in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E3 (CFPA 587)

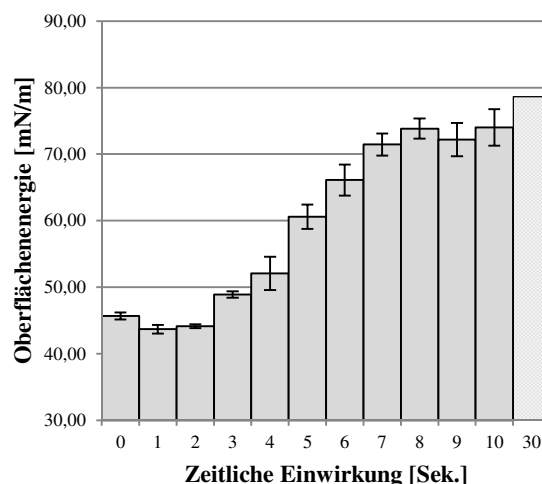


Abbildung 5-39: Veränderung der Oberflächenenergie in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E4 (CFPA 643)

Benetzungsveränderungen der polaren und dispersen Anteile

Bei der Betrachtung der Veränderungen der polaren Anteile verzeichnen die Weißbleche E1 (ETP; von 3,32 mN/m auf 25,00 mN/m innerhalb des 10-Sekunden-Intervalls) und E4 (CFPA 643; von 4,00 mN/m auf 30,34 mN/m innerhalb des 10-Sekunden-Intervalls) signifikante Steigerungsraten. Nach 30 Sekunden erreichen die Weißbleche E1 (ETP), E2 (ECCS) und E4 (CFPA 643) jeweils einen polaren Anteil zwischen 30 und 35 mN/m. Auf Weißblech E3 (CFPA 587) ist, analog zur Kontaktwinkelbetrachtung, eine Anomalie in Form eines Abfalls des polaren Anteils innerhalb der ersten Sekunden erkennbar. Dieser Abfall auf Weißblech E3 (CFPA 587) ist auch bei den dispersen Anteilen der Oberflächenenergie zu sehen und noch stärker ausgeprägt. Auch bei den Weißblechen E2 (ECCS) und E4 (CFPA 643) sinken die dispersen Anteile eingangs, während auf Weißblech E1 (ETP) eine permanente Steigerungsrate zu verzeichnen ist.

Die folgenden Abbildungen zeigen die durch den Excimer-Strahler bewirkten Veränderungen der polaren und dispersen Anteile in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung:

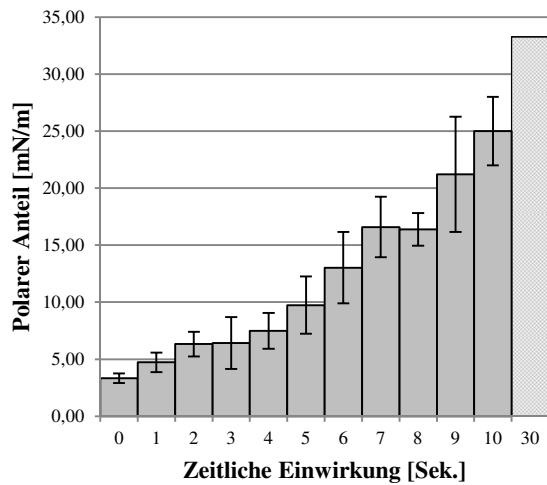


Abbildung 5-40: Veränderung des polaren Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E1 (ETP)

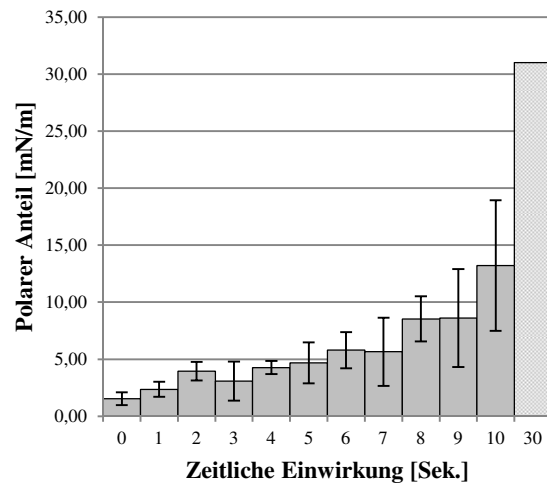


Abbildung 5-41: Veränderung des polaren Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E2 (ECCS)

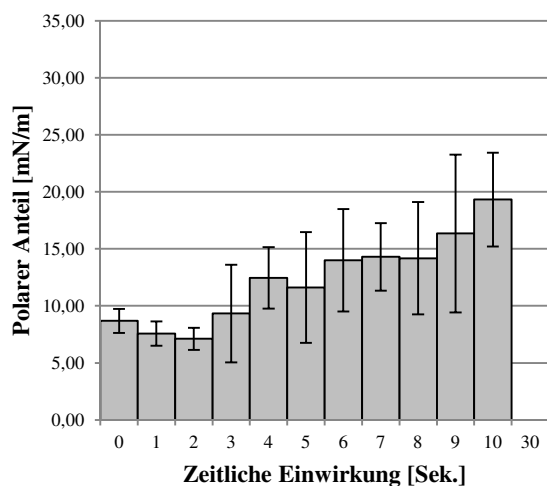


Abbildung 5-42: Veränderung des polaren Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E3 (CFPA 587)

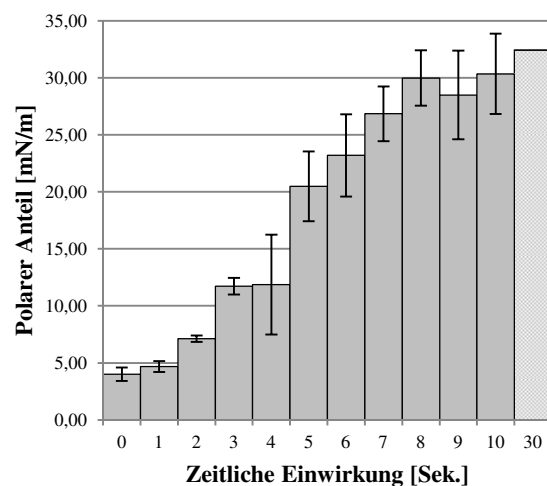


Abbildung 5-43: Veränderung des polaren Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E4 (CFPA 643)

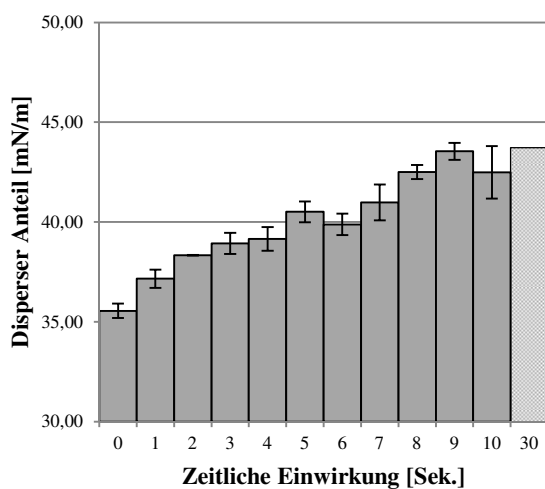


Abbildung 5-44: Veränderung des dispersen Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E1 (ETP)

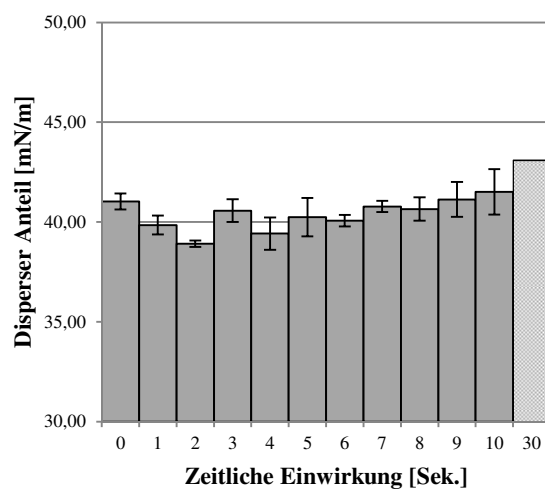


Abbildung 5-45: Veränderung des dispersen Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E2 (ECCS)

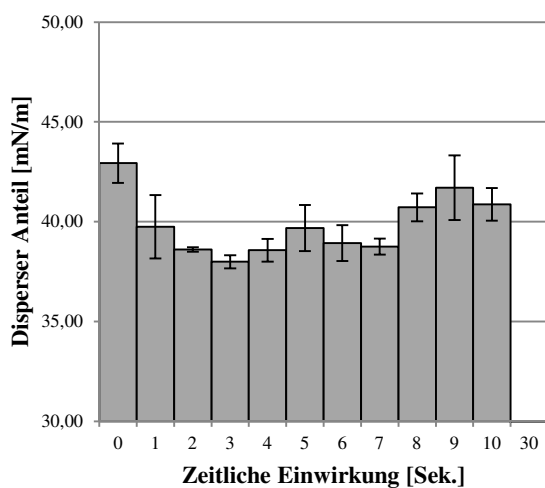


Abbildung 5-46: Veränderung des dispersen Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E3 (CFPA 587)

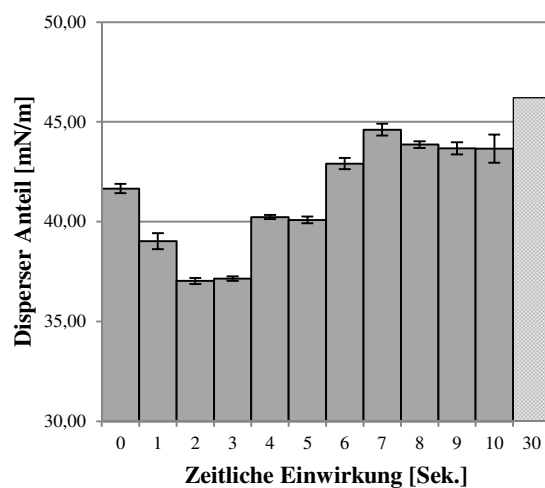


Abbildung 5-47: Veränderung des dispersen Anteils in Abhängigkeit der zeitlichen Einwirkung des Excimer-Strahlers auf E4 (CFPA 643)

Zwischenfazit zur Excimer-Vorbehandlung

Die Versuchsreihen der Kontaktwinkelbestimmung zeigen, dass mittels einer Excimer-Vorbehandlung eine signifikante Veränderung der Benetzungseigenschaften (Abnahme der Kontaktwinkel, Zunahme der polaren Anteile) auf Weißblechen herbeizuführen ist. Ferner wird deutlich, dass die Dauer der Strahlungseinwirkung von großer Bedeutung ist, da aus längeren Vorbehandlungszeiten verbesserte Haftungseigenschaften resultieren. Nicht zu klären ist, welche Vorbehandlungszeit für einen möglichen Praxiseinsatz zu wählen ist. Die Vorbehandlungszeit ist aber maßgeblich für den konstruktiven und maschinenbaulichen Umfang einer möglichen Vorbehandlungsvorrichtung innerhalb einer Druckmaschine.

Diesbezüglich soll im Folgenden näher auf die Bedeutung für die Integration in eine Drucklinie eingegangen werden. Die Taktlänge innerhalb einer Druckmaschine wird mit 1,4 m angenommen. Mit dieser Annahme ist es möglich, die Produktionsgeschwindigkeit einer Druckmaschine in die Oberflächengeschwindigkeit der Tafeln umzurechnen (siehe Tabelle 5-18).

Tabelle 5-18: Zusammenhang zwischen der Produktionsgeschwindigkeit einer Druckmaschine und der daraus resultierenden Oberflächengeschwindigkeit der Tafeln

Produktionsgeschwindigkeit	3.000 Tafeln/Std.	6.000 Tafeln/Std.	10.000 Tafeln/Std.
Oberflächengeschwindigkeit der Tafeln	~1,2 m/Sek.	~2,3 m/Sek.	~3,9 m/Sek.

Aus der Oberflächengeschwindigkeit der Tafeln lässt sich ableiten, welchen maschinenbaulichen Umfang eine mögliche Vorbehandlungsvorrichtung besitzen müsste. Beispiel: Bei einer weiteren Annahme, dass eine Vorbehandlungszeit von einer Sekunde ausreichend sei, bedeutet dies, dass bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 6.000 Tafeln/Std. die Vorbehandlungsvorrichtung eine Wirklänge von ~2,3 m besitzen müsste.

Welchen Einfluss eine Excimer-Vorbehandlung auf die Haftungseigenschaften einer UV-Farbe besitzt, soll durch den folgenden Gitterschnitttest untersucht werden.

5.5.5 Gitterschnitttest

Für den Gitterschnitttest wird auf die Weißbleche die UV-Farbe aufgetragen (nach Abschnitt 5.5.1). Vor dem Auftrag werden die Weißbleche (E1-E4) mittels Excimer-Strahler vorbehandelt. Die gewählten Vorbehandlungszeiten betragen null (ohne Vorbehandlung), eine und fünf Sekunden.

Die Bewertung der Proben erfolgt nach DIN EN ISO 2409 nach Durchführung des Gitterschnitttests (siehe Abschnitt 4.1.2) sowie dem anschließenden Tesa-Test (siehe Abschnitt 4.1.3). Die Ergebnisse für die sofortige Prüfung sind in Abbildung 5-48 dargestellt. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 24 Std. nach dem Auftrag sind in Abbildung 5-49 aufgeführt. Die Ergebnisse der Vorbehandlungszeiten sind für jedes Weißblech gruppiert dargestellt.

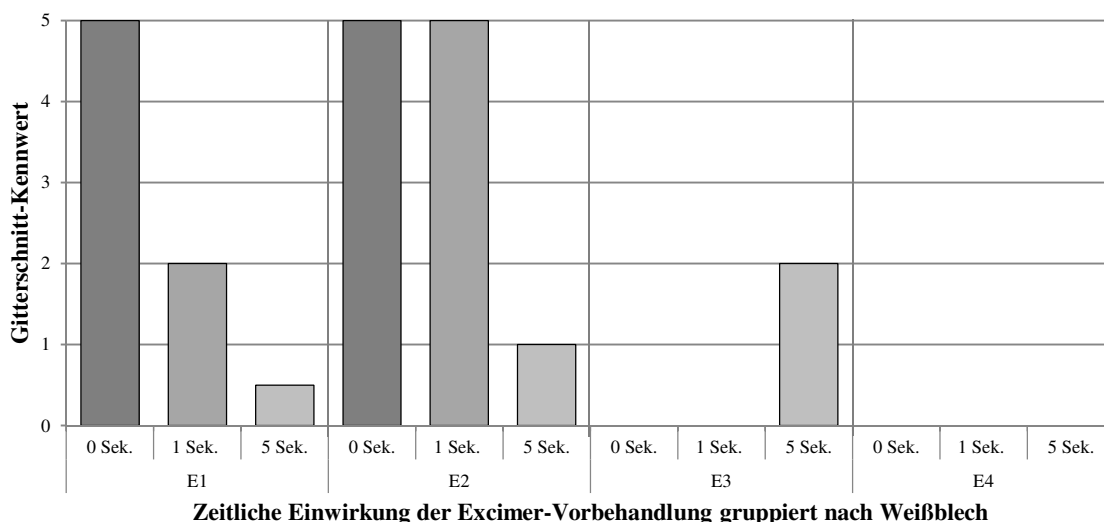


Abbildung 5-48: Gitterschnitt-Kennwerte unmittelbar nach dem Auftrag mit Abstufungen der zeitlichen Einwirkung der Excimer-Vorbehandlung

Weißblech E1 (ETP) zeigt deutlich einen Zusammenhang zwischen der Vorbehandlungszeit und den Haftungseigenschaften. Ohne Vorbehandlung löst sich die Farbe vollständig (bewertet mit Gitterschnitt-Kennwert: 5) vom Weißblech, während die Ablösungen mit einer fünf sekundigen Vorbehandlung lediglich marginal ausgeprägt sind (bewertet mit Gitterschnitt-Kennwert: 0,5). Auch Weißblech E2 (ECCS) zeigt nach fünf Sekunden nur noch geringe Ablösungen. Verdeutlicht werden die positiven Veränderungen auch bei Betrachtung der zweiten Gitterschnitttestserie 24 Std. nach dem Auftrag, bei der nach fünf Sekunden keine Ablösungen der Farbe auftreten. Das Weißblech E3 (CFPA 587) zeigt, wie bereits bei den

Kontaktwinkelmessungen, auffällige Ergebnisse. Bei beiden Gitterschnitttestserien zeigt sich mit zunehmender Vorbehandlungszeit eine Verschlechterung der Haftung. Die Ergebnisse auf Weißblech E4 (CFPA 643) sind als sehr positiv zu beurteilen. Bei keinem Gitterschnitttest kommt es zu Ablösungen der Farbe (bewertet mit Gitterschnitt-Kennwert: 0). Daher sind die Haftungseigenschaften der Farbe auf dem Weißblech als sehr gut zu beurteilen.

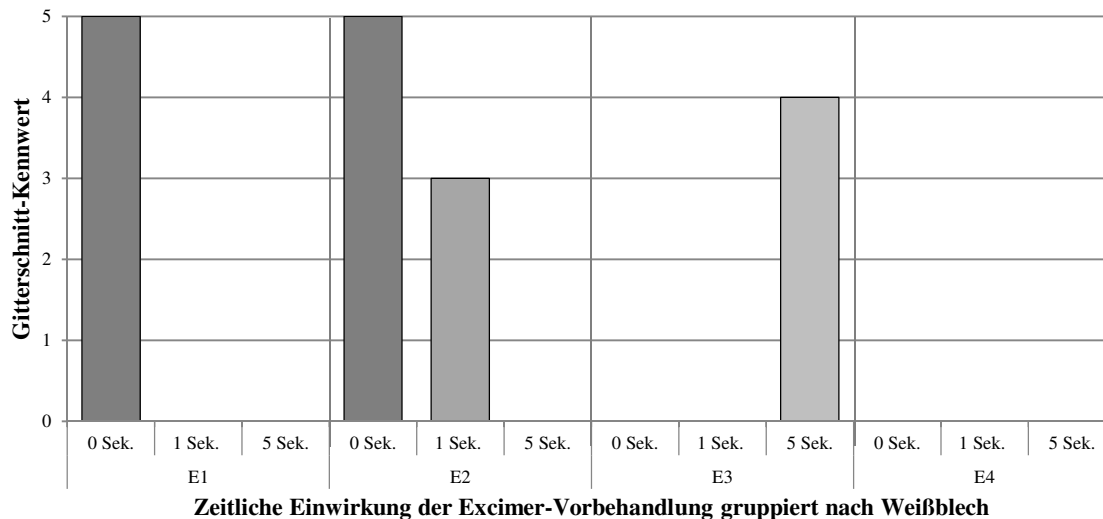


Abbildung 5-49: Gitterschnitt-Kennwerte 24 Std. nach dem Auftrag mit Abstufungen der zeitlichen Einwirkung der Excimer-Vorbehandlung

Die Versuche des Gitterschnitttests sowie des Tesa-Tests erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Chromfrei passivierte Weißbleche (CFPA) verfügen über sehr gute Haftungseigenschaften, da auch ohne eine Vorbehandlung keinerlei Ablösungen entstehen und damit Gitterschnitt-Kennwerte von 0 erreicht werden.
- Eine Excimer-Vorbehandlung besitzt einen positiven Einfluss auf die Haftungseigenschaften der Farben auf Weißblech. Dies wird an den Gitterschnitt-Kennwerten deutlich, welche mit einer Erhöhung der Vorbehandlungszeit abnehmen.
- Die Nachhärtung der Farbe spielt eine Rolle auf die Haftungseigenschaften der Farbe auf dem Weißblech. An den Gitterschnitt-Kennwerten zeigt sich, dass 24. Std. nach dem Auftrag der Farbe (wie auch in Abschnitt 5.2.2 und in Abschnitt 5.4.6 beobachtet wurde) verringerte Gitterschnitt-Kennwerte erreicht werden. D. h., dass es zu weniger Ablösungen kommt und die Farbe stärker haftet.

5.5.6 XPS-Analyse

Zur Diskussion der XPS-Analyse stehen vordergründig die Veränderungen der C-Peaks. Diese wurden im Vorfeld als zu untersuchender Parameter gezielt ausgewählt. Dazu sind exemplarisch zwei XPS-Analysen von Weißblech E4 (CFPA 643) in den Abbildung 5-50 (ohne Vorbehandlung) und Abbildung 5-51 (mit 30 Sek. Excimer Vorbehandlung) dargestellt.

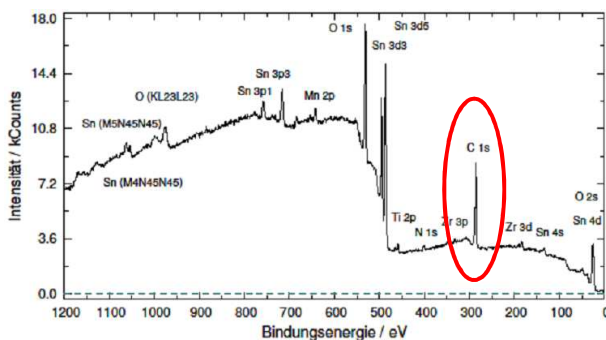


Abbildung 5-50: XPS-Analyse von Weißblech E4 (CFPA 643) ohne Vorbehandlung

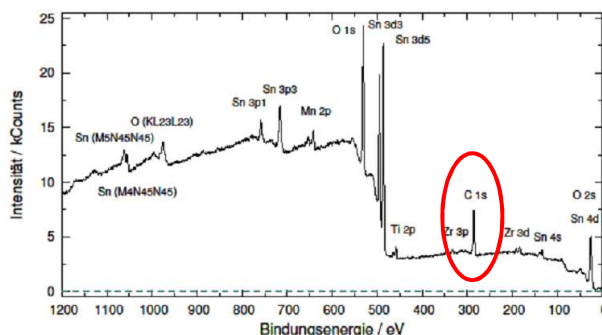


Abbildung 5-51: XPS-Analyse von Weißblech E4 (CFPA 643) mit 30 Sek. Excimer Vorbehandlung

Die XPS-Analyse wurde für jedes Weißblech einmal ohne Vorbehandlung und einmal mit 30 Sek. Excimer-Vorbehandlung durchgeführt. Für die Auswertung der Versuchsreihe werden jeweils die Werte der C-Peaks (roter Rahmen) miteinander verglichen. Die ausführlichen Ergebnisse der XPS-Analyse liegen in Anhang A.3 vor.

Die XPS-Analysen der vier Weißbleche zeigen die chemische Zusammensetzung der jeweiligen Oberflächen der Weißblechproben. Auf E1 (ETP) sind mehrere Sn-Peaks sowie Cr-Peaks der Passivierung erkennbar, während bei E2 (ECCS) die Cr-Peaks dominieren. Auf den beiden CFPA-Weißblechen E3 und E4 wird deutlich, dass kein Chrom vorliegt. Dafür sind Peaks bei Ti und Zr sowie weiteren Elementen vorliegend. Bei einer vergleichenden Betrachtung, ohne und mit Vorbehandlung, liegt der Fokus auf den C-Peaks. Während ohne Vorbehandlung diverse Kohlenstoff-Verbindungen auf den Weißblechen vorliegen, werden diese aufgrund der Vorbehandlung mit dem Excimer-Strahler jeweils signifikant reduziert. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass eine tatsächliche Oberflächenreinigung aufgrund der Strahlungseinwirkung mit kurzwelligem V-UV (172 nm) stattfindet, da eine Vielzahl von Kohlenstoff-Verbindungen degradiert werden. Die Ergebnisauswertungen der C-Peaks sind in Abbildung 5-52 für E1 (ETP), Abbildung 5-53 für E2 (ECCS), Abbildung 5-54 für E3 (CFPA 587) und Abbildung 5-55 für E4 (CFPA 643) aufgeführt:

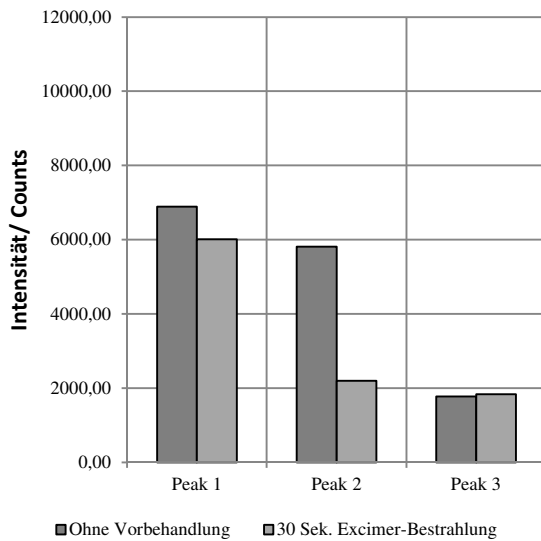


Abbildung 5-52: Auswertung der XPS-Analyse zur Veränderung der Kohlenstoff-Peaks am Substrat ETP

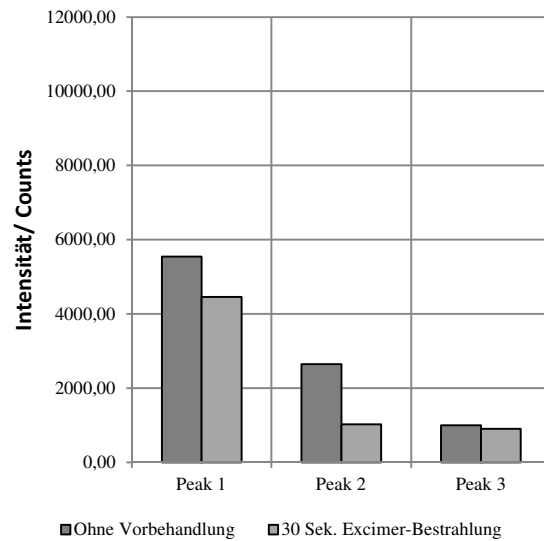


Abbildung 5-53: Auswertung der XPS-Analyse zur Veränderung der Kohlenstoff-Peaks am Substrat ECCS

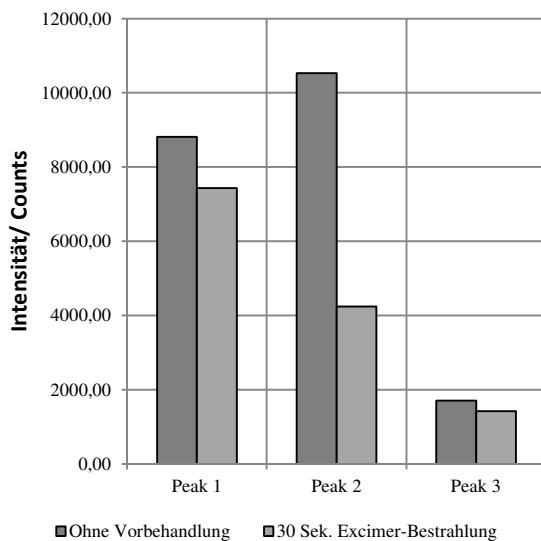


Abbildung 5-54: Auswertung der XPS-Analyse zur Veränderung der Kohlenstoff-Peaks am Substrat CFPA 587

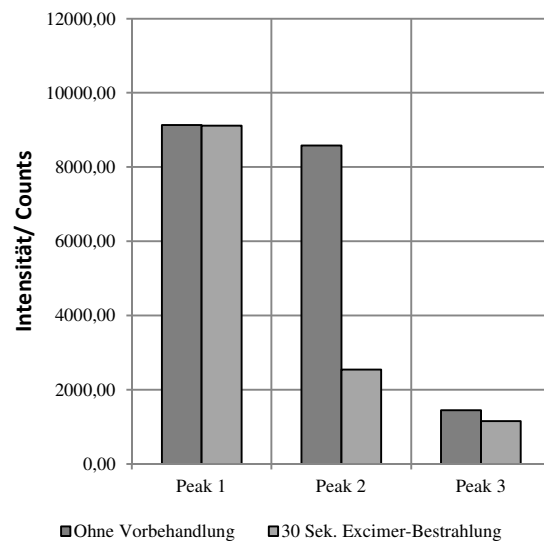


Abbildung 5-55: Auswertung der XPS-Analyse zur Veränderung der Kohlenstoff-Peaks am Substrat CFPA 643

Die XPS-Analyse hat gezeigt, dass es aufgrund der Excimer-Strahlung zu einer Reduktion von Kohlenstoffverbindungen kommt. Diese Erkenntnis erlaubt die Schlussfolgerung, dass eine energiereiche UV-Bestrahlung zu einem Reinigungseffekt auf der Weißblechoberfläche führt. Dieser Zusammenhang wird in Abschnitt 6.3 weiter diskutiert.

6. Diskussion

Die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse erstrecken sich auf die Themen UV-Farbentwicklung und deren Haftungseigenschaften auf verschiedenen Blechsubstraten, im weiteren Verlauf ebenfalls auf das Haftungsverhalten bei Umformung unter Einsatz verschiedener Prüfmethode sowie die Untersuchung von UV-Vorbehandlungsverfahren. Alle behandelten Themengebiete sind durch Einbeziehung der Oberflächeneigenschaften der verwendeten Substrate im Hinblick auf Kontaktwinkel und Haftung miteinander verbunden. In diesem Kapitel 6 werden nun die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse diskutiert, um im abschließenden Kapitel 7 Rückschlüsse auf konzeptionelle Folgerungen im Hinblick auf mögliche Druckmaschinenkonzepte ziehen zu können.

Das vorliegende Kapitel gliedert sich in drei Abschnitte. Eingangs wird in Abschnitt 6.1 der Einfluss der eingesetzten Materialien, Farbe und Weißblech diskutiert. Eine bedeutende Rolle fällt dabei dem chromfreien Weißblech CFPA zu, welches über sehr positive Oberflächeneigenschaften verfügt.

In Abschnitt 6.2 werden Rückschlüsse auf die Umformungsversuche gezogen und ein Zusammenhang zwischen den Verpackungsprodukten, den Weiterverarbeitungsprozessen und den Prüfmethode hergestellt, um daraus eine Methode zur Herleitung produktspezifischer Prüfmethode in Abhängigkeit der angewandten Weiterverarbeitungsprozesse zu erarbeiten.

Im dritten Abschnitt 6.3 werden schließlich die Wirkmechanismen der UV-Vorbehandlung unter dem Aspekt photochemischer Reaktionen diskutiert, um für die Vorgänge während der UV-Vorbehandlung ein besseres Verständnis entwickeln zu können. Abschließend erfolgt ein Vergleich der aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse mit bereits bestehenden Ergebnissen ähnlicher Versuchsaufbauten der Literatur.

6.1 Einfluss der eingesetzten Materialien

In diesem Abschnitt werden die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse in Bezug auf die eingesetzten Materialien diskutiert.

6.1.1 Weißblech

Im Folgenden werden die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich des Weißbleches diskutiert.

Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen wurden drei verschiedene Weißblechsorten untersucht. Zum einen waren dies vornehmlich die Weißbleche ETP und ECCS, zum anderen das chromfreie Weißblech CFPA, mit verschiedenen Einölungen und Passivierungen. Während der Vorversuche hat sich an den Gitterschnitttests (vgl. Abschnitt 4.1.2) gezeigt, dass, im Vergleich zu ECCS, ETP mit einer erhöhten Zinnaufgabe verbesserte Haftungseigenschaften aufweist (vgl. Abschnitt 5.2.2). Während der Untersuchungen zur Umformbarkeit schnitten die ECCS-Weißbleche wiederum positiver ab. Eine klare Empfehlung kann im Vergleich beider Weißbleche daher nicht abgegeben werden (vgl. Abschnitt 5.3.6).

Ein anderes Bild ergab sich bei der Verwendung von CFPA-Blech. Dieses verfügt aufgrund der Titan/ Zirkonium-Passivierung über positive Eigenschaften hinsichtlich der Haftung, was sich auch anhand der Gitterschnitttests bestätigte (vgl. Abschnitt 5.4.6 und Abschnitt 5.5.5). Selbst nach Durchführung des Gitterschnitts unmittelbar nach dem Auftrag wurden keinerlei Ablösungen auf CFPA erkennbar.

In Abbildung 6-1 sind die in den Untersuchungen der Vorbehandlungsverfahren und der Excimer-Vorbehandlung (Abschnitte 5.4 und 5.5) verwendeten Weißbleche (ohne Vorbehandlung) bezüglich der nach Abschnitt 4.1.1 ermittelten Benetzungseigenschaften gegenübergestellt. Zudem wurden Mittelwerte der Kontaktwinkel und der polaren Anteile der Oberflächenenergie nach Weißblechsorte gebildet und in Abbildung 6-1 dargestellt.

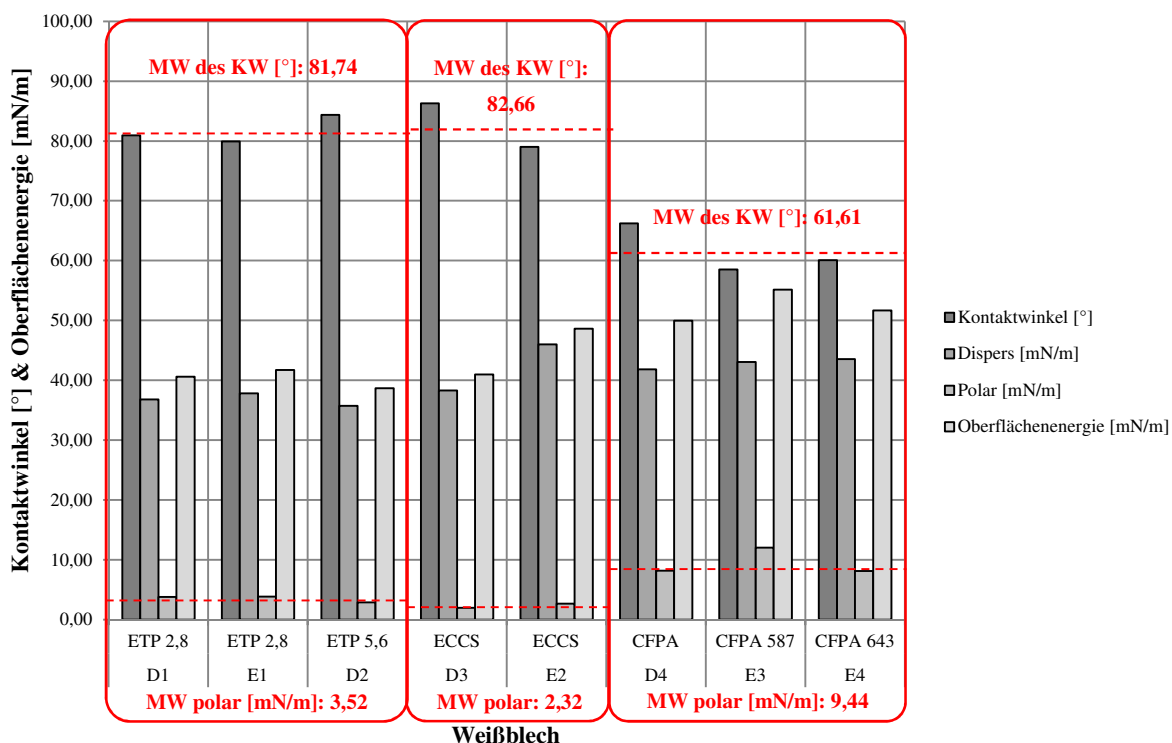


Abbildung 6-1: Gegenüberstellung der Benetzungseigenschaften der verwendeten Weißbleche (vgl. Abbildung 5-7 und Abbildung 5-31) aus den beiden Untersuchungen zur Vorbehandlung (vgl. Abschnitte 5.4.3 und 5.5.3); Die roten Linien geben die Mittelwerte von Kontaktwinkel und polaren Anteilen an

Während ETP und ECCS einen Mittelwert der Kontaktwinkel von $>80^\circ$ besitzen, liegt das Niveau des Kontaktwinkels bei den CFPA-Sorten bei $\sim 61^\circ$. Analog dazu weisen CFPA-Weißbleche auch einen verhältnismäßig hohen polaren Anteil von ~ 9 mN/m auf. Eine zusätzliche Verifizierung wurde durch die Gitterschnitttests erzielt, bei denen vom CFPA-Weißblech keinerlei Ablösungen zu beobachten waren.

Für einen UV-Direktauftrag ist chromfreies CFPA-Weißblech daher prädestiniert. Aufgrund der Tatsache, dass im Zuge der sich abzeichnenden REACH-Verordnung das bei ETP und ECCS verwendete Cr_6 zukünftig keine Rolle mehr spielen soll, ist die Entwicklung hinsichtlich des Weißblechs CFPA als sehr positiv zu bewerten.

Eine weitere Diskussion zur Beurteilung der Weißbleche ergibt sich bei einem Vergleich der Gitterschnitt-Kennwerte (vgl. Abschnitt 4.1.2). In Abbildung 6-2 sind aus den Versuchsreihen der Abschnitte 5.4 und 5.5 die Gitterschnitt-Kennwerte (sofort/ unmittelbar nach dem Auftrag) aufgeführt, bei denen keine Vorbehandlung durchgeführt wurde. Die verwendete Farbe war jeweils Farbe mit der Nr. 110.

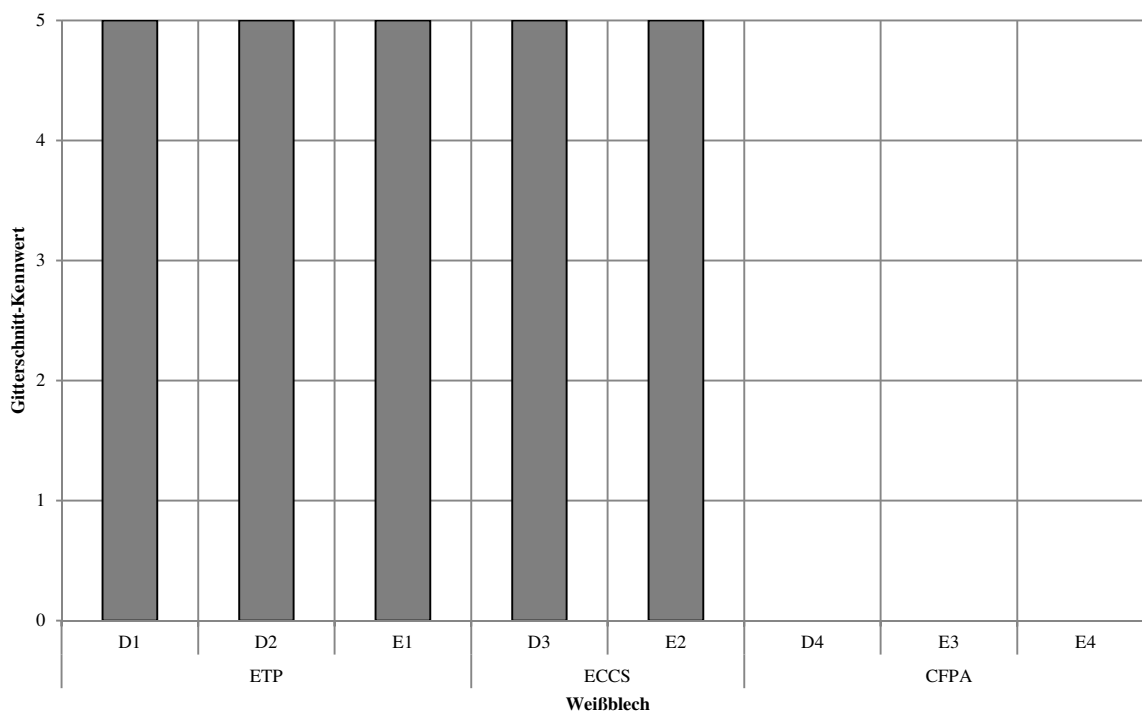


Abbildung 6-2: Vergleich der Gitterschnitt-Kennwerte (sofort/ unmittelbar nach dem Auftrag) der Versuche Vorbehandlungsverfahren und Excimer-Vorbehandlung ohne den Einsatz einer Vorbehandlung jeweils mit der Farbe Nr. 110 gruppiert nach Weißblechsorte

Das Ergebnis des Gitterschnitt-Kennwert-Vergleichs zeigt, dass es unter Verwendung von Farbe Nr. 110 auf den Weißblechen ETP und ECCS mit Gitterschnitt-Kennwerten von 5 zu vollständigen Ablösungen kommt, während es auf dem chromfreien Weißblech CFPA mit Gitterschnitt-Kennwerten von 0 zu keinerlei Ablösungen kommt.

Schlussfolgernd kann aus diesem Ergebnis abgeleitet werden, dass bei einem UV-Direktauftrag auf CFPA-Weißblechen der Einsatz eines Vorbehandlungsverfahrens, gleich welcher Art, nicht notwendig ist.

6.1.2 Farbe

Die Versuche haben gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, mit einem UV-härtenden Farbsystem auf Weißblechen einen mit ausreichend Haftung ausgestatteten Schichtauftrag zu erzielen. Daher sind bei den ausblickenden, konzeptionellen Folgerungen entsprechende Farbwerktechnologien zu berücksichtigen, mit denen die zu erzielenden Schichtdicken von 4 – 5 µm erreicht werden können. Bei höheren Schichtdicken UV-härtender Weißfarben kann eine vollständige Durchhärtung bis zum Schichtgrund nicht mehr gewährleistet werden. Da die genaue Zusammensetzung der eingesetzten Farben dem Betriebsgeheimnis der Fa. Zeller Gmelin unterliegen, ist eine weitere Diskussion nicht möglich.

6.2 Prüfmethoden zur Umformung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung zur Umformbarkeit (vgl. Abschnitt 5.3) diskutiert. Zudem wird im weiteren Verlauf eine Klassifikation vorgestellt, welche die gängigen Prüfmethoden mit den produktspezifischen Prozessen der Weiterverarbeitung als deren Mindestprüfanforderung definiert.

6.2.1 Diskussion zur Umformbarkeit

Die Untersuchungen zur Umformbarkeit wurden mit denen in Abschnitt 4.3 vorgestellten Methoden durchgeführt. Die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse sind in Abschnitt 5.3 aufgeführt. Im Folgenden werden diese diskutiert.

Die Weißblechproben der Untersuchung zur Umformbarkeit wurden in der Vorbereitung mit UV-härtenden Farben (Nr. 110, Nr. 111, Nr. 119; vgl. Tabelle 5-6) beschichtet. Diese Farben sind jedoch nicht auf Beständigkeiten ggü. mechanischen Beanspruchungen ausgelegt. Aus diesem Grunde wurde für die Versuche der Umformbarkeit ein zusätzlicher Schutzlackauftrag mit thermisch trocknendem Lack auf die Proben aufgetragen, mit dem eine grundsätzliche Vergleichbarkeit erzielt werden konnte. Dadurch konnten in den Versuchen Schlagfalttest, Ritzhärte-Prüfung (vgl. Abschnitt 5.3.3), Beta-Napf-Prüfung (vgl. Abschnitt 5.3.4) und Tiefungsversuch (vgl. Abschnitt 5.3.5) positive Ergebnisse erzielt werden. Lediglich bei der Beta-Napf-Prüfung mit anschließender Sterilisation kam es zu Ablösungen der Farbe. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich zwei wesentliche Rückschlüsse ziehen: eine eingeschränkte Sterilisationsfähigkeit und zusätzlicher Schutzlackauftrag bei Umformungsversuchen.

Eingeschränkte Sterilisationsfähigkeit



Abbildung 6-3: Geformter Weißblechnapf der Beta-Napf-Prüfung ohne Sterilisation; Weißblech C2 ETP mit Farbe Nr. 110



Abbildung 6-4: Geformter Weißblechnapf der Beta-Napf-Prüfung mit anschließender Sterilisation; Weißblech C2 ETP mit Farbe Nr. 110



Abbildung 6-5: Umgeformte Weißblechprobe nach Tiefungsversuch mit anschließender Sterilisation; Weißblech C2 ETP mit Farbe Nr. 110

Die Untersuchung (vgl. Abschnitt 5.3.4) hat gezeigt, dass bei einer starken Umformung des Weißbleches eine Haftung der UV-härtenden Farbe noch gegeben ist (Abbildung 6-3). Wird aber eine anschließende Sterilisation durchgeführt, löst sich der Haftverbund auf (Abbildung 6-4). Dies lässt sich wie folgt erklären: aufgrund der starken Umformung des Weißblechs während der Beta-Napf-Prüfung kommt es zu einer Schwächung des Farbe-Weißblech-Verbundes. Durch den anschließenden Sterilisierungsprozess mit VE-Wasser werden die noch verbliebenen Haftpunkte der Grenzflächen zerstört, was zu einer Ablösung der Farbe führt. Die geprüfte Farbe ist in Kombination mit einer starken Tiefzieh-Beanspruchung daher nicht sterilisierfähig, woraus eine Einschränkung im Anwendungsbereich von Nahrungsmittelverpackungen resultiert. Diese Einschränkung betrifft allerdings nicht alle Anwendungen, da der Tiefungsversuch (als Laborsimulation für z. B. Mantelrillen) mit anschließender Sterilisation zu keinen Ablösungen führte (Abbildung 6-5).

Umformungsversuche mit Schutzlackauftrag

Der zweite Rückschluss der Versuche bezieht sich auf die Auswahl der Auftragsschichten. Wie eingangs erwähnt wurde ein thermisch trocknender Schutzlack auf die Probebleche aufgetragen. Um nun dem Grundgedanken einer vollständigen UV-Direktbedruckung Rechnung zu tragen, müsste ausblickend eine weitere Versuchsreihe mit vollständigen UV-Auftragsschichten (Außenauftrag-, Druck- und Schutzlackauftrag) durchgeführt und die Ergebnisse mit der hier behandelten Versuchsreihe verglichen werden.

6.2.2 Prozesse und Produkte

Eine Auffälligkeit bei der Durchführung der Versuche zur Umformbarkeit war, dass keine Systematik zum produktspezifischen Prüfen existiert. Zwar bieten die größtenteils genormten Prüfmethoden eine ausreichende Hilfestellung zur Evaluierung von Entwicklungsprozessen, jedoch fehlt eine klare Korrelation zu den Endprodukten. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass das Produktspektrum von Metallverpackungen über eine enorme Vielfalt verfügt. Aus diesem Grunde soll anhand der Beispiele Kronkorken, Nockendrehverschluss und Konservendose exemplarisch eine Methode aufgezeigt werden, mit der mittels der angewandten produktspezifischen Umformungsprozesse Rückschlüsse auf die jeweils notwendigen Prüfmethoden gezogen werden können.

In einem ersten Schritt sind hierfür in der Tabelle 6-1 die relevanten Prüfmethoden aufgeführt, welche den anwendbaren Weiterverarbeitungsprozessen zugeordnet werden.

Tabelle 6-1: Aufstellung der Prüfmethoden mit Zuordnung zu Weiterverarbeitungsprozessen

Prüfmethode	Zweck	Anwendbarer Weiterverarbeitungsprozess
Gitterschnitttest	Zur Prüfung der Farb-/ Lackhaftung	Stanzen, Schneiden, Haftung
Tesa-Test	Zur Prüfung der Farb-/ Lackhaftung separat oder in Kombination mit dem Gitterschnitttest	Stanzen, Schneiden, Haftung
Ritzhärte	Prüfung der Beschichtungshärte ggü. äußeren mechanischen Belastungen wie Reibung, Kratzen etc.	Reibung, mechanische Beanspruchungen, Kratzen
Dornbiegeversuch	Prüfung auf Rissbildung oder Ablösungen der Applikation bei leichten Biegebeanspruchungen	Biegen, Falzen
T-Biegeprüfung	Prüfung auf Rissbildung oder Ablösungen der Applikation bei starken Biegebeanspruchungen	Bördeln
Tiefungsversuch	Prüfung der Beschichtung bei leichter Deformation des Prüflings	Leichtes Tiefziehen
Beta-Napf-Prüfung	Prüfung der Beschichtung bei starker Deformation des Prüflings	Starkes Tiefziehen
Schlagfalttest	Prüfung der Beschichtung bei schlagartiger Umformungsbeanspruchung, normiert als Schlagfestigkeit bezeichnet	Biegen, Falzen
Sterilisation	Prüfung auf Resistenz ggü. säurehaltiger o. ä. Flüssigkeiten sowie gleichzeitiger Temperatureinwirkung	Nahrungsmittel, Food

Die Prüfungen Gitterschnitttest und Tesa-Test dienen in erster Linie zur Evaluation der Haftung. Zusätzlich sind noch die Prozesse Stanzen und Schneiden diesen Prüfungen zugeordnet, da es durch die Trennprozesse zu mangelnder Haftung an den Trennlinien kommen kann. Die Prüfungen Dornbiegeversuch (leichte Biegebeanspruchung), T-Biegeprüfung (starke Biegebeanspruchung) und Schlagfestigkeit/ Schlagfalttest (schlagartige Biegebeanspruchung) sind den Prozessen Biegen, Falzen und Bördeln zugeordnet. Für den Prozess des Tiefziehens können der Tiefungsversuch (leichtes Tiefziehen) und die Beta-Napf-Prüfung (starkes Tiefziehen) herangezogen werden. Zudem ist jeweils eine Kombination mit dem Tesa-Test (zur weiteren Haftungsprüfung) und der Sterilisation (für Nahrungsmittel) möglich. Diese Kombination wurde während der Umformungsversuche durchgeführt, wird aber bei der Zuordnung der produktspezifischen Prüfmethoden nicht berücksichtigt.

Nachdem nun in Tabelle 6-1 die Prüfmethoden den Weiterverarbeitungsprozessen zugeordnet sind, werden in einem zweiten Schritt die produktspezifischen Weiterverarbeitungsprozesse analysiert und in einzelne Prozessschritte granuliert. Dadurch ist es möglich, einen Bezug zwischen den Prüfmethoden und den Endprodukten zu schaffen. An den Beispielen Kronkorken, Nockendrehverschluss und Konservendosen (Mantel) wird auf den folgenden Seiten diese Methode exemplarisch durchgeführt. Anschließend ist in Tabelle 6-2 eine Klassifikation der Produktgruppen, deren Weiterverarbeitungsprozessen und den angewandten Prüfmethoden dargestellt. Anzumerken sei an dieser Stelle, dass mit dieser Darstellung kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht, da die Produktvielfalt bei Metallverpackungen sehr divers ist. Tabelle 6-2 ist vielmehr als eine Indikation zur Korrelation der produktspezifischen Prüfmethoden zu betrachten.

Kronkorken

Zur Herstellung von Kronkorken werden die auf der Tafel aufgedruckten Rundnutzen durch Stanzung (Gitterschnitttest und Tesa-Test) vereinzelt. Anschließend wird mittels Stempel der Tiefzug (Tiefungsversuch) mit gleichzeitiger Zackenbildung erzielt. In einem Trommelkarussell findet abschließend die Entgratung der Ränder durch mechanische Reibung (Ritzhärteprüfung) statt. Damit ist der Formgebungsprozess für Kronkorken abgeschlossen und die Zuordnung einer jeweiligen Prüfmethode erfolgt. Der Weiterverarbeitungsprozess für Kronkorken sowie die Zuordnung der Prüfmethoden ist in Abbildung 6-6 dargestellt.

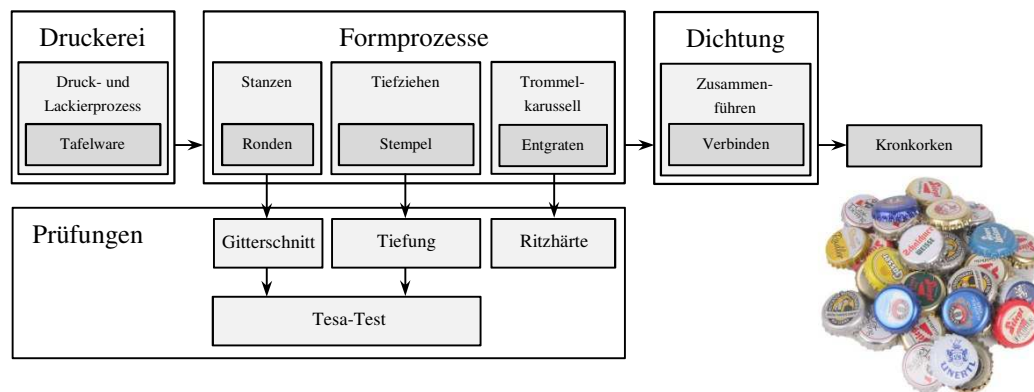


Abbildung 6-6: Weiterverarbeitungsprozesse zur Herstellung von Kronkorken mit daraus abgeleiteten Prüfungen [eigene Darstellung]; Bildquelle: [Deggelbam 2018]

Verschlüsse: am Beispiel des Nockendrehverschlusses

Bei Verschlüssen herrscht eine sehr hohe Sortenvielfalt. Nachfolgend seien nur einige Verschlussarten benannt [Müller & Bauer 2017], welche sich in der Herstellung stark unterscheiden:

- Eindrückdeckel
- Nockendeckel
- Schraubdeckel
- Ringdeckel
- Aufreißdeckel
- Falzdeckel
- Stülpdeckel
- Scharnierdeckel
- Nockendrehverschluss

Zur exemplarischen Prozessanalyse wird ein Nockendrehverschluss herangezogen, da bei diesem sehr starke Umformprozesse angewandt werden und damit auch die Anforderungen an die Beschichtungen äußerst hoch sind. Der Herstellungsprozess für den Nockendrehverschluss sowie die Zuordnung der Prüfmethode ist in Abbildung 6-7 dargestellt.

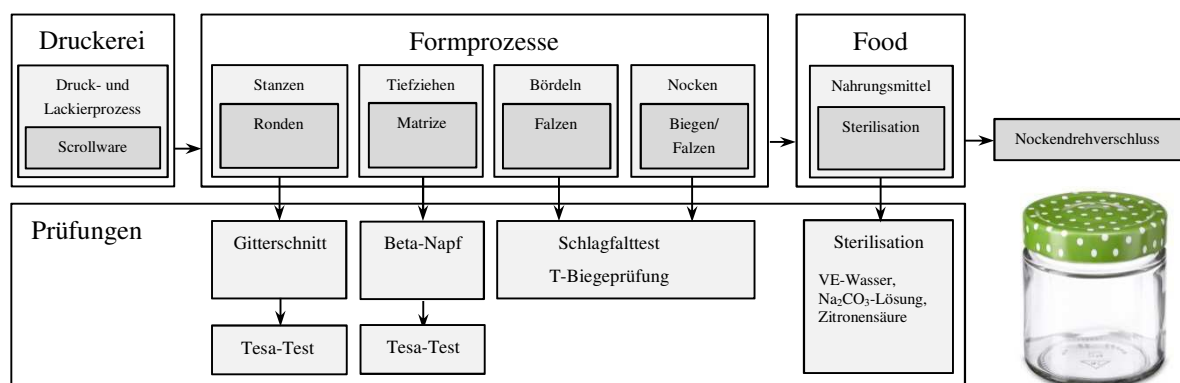


Abbildung 6-7: Weiterverarbeitungsprozesse zur Herstellung von Schraubverschlüssen mit daraus abgeleiteten Prüfungen [eigene Darstellung]; Bildquelle: [Discounto 2018]

Konservendose

Der vollständige Herstellungsprozess für eine dreiteilige Konservendose wurde bereits in Abbildung 2-5 [Empac 2016] dargestellt. Analog zu den Kronkorken (Abbildung 6-6) und dem Nockendrehverschluss (Abbildung 6-7) sind in Abbildung 6-8 die Formprozesse des Konservendosenmantels vertiefend dargestellt. Auch hier lassen sich Rückschlüsse auf die entsprechenden Prüfmethoden ziehen.

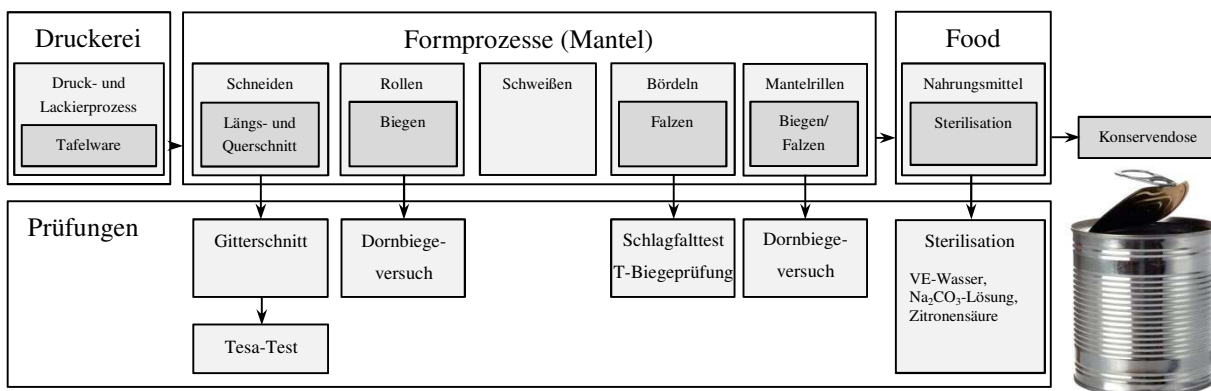


Abbildung 6-8: Weiterverarbeitungsprozesse zur Herstellung des Mantels von Konservendosen mit daraus abgeleiteten Prüfungen [eigene Darstellung]; Bildquelle: [Duden 2018]

Auf Basis dieser Beispiele zeigt sich, dass Umformprozesse und Weiterverarbeitungsprozesse sehr produktspezifisch sind und eine Aussage zu den notwendigen Prüfmethoden nur anhand des jeweiligen Produktes respektive des betreffenden Produktteils zu treffen ist. Trotzdem ist es nun möglich, eine Aufstellung bezüglich der produktspezifischen Mindestprüfanforderungen zu erarbeiten.

In Tabelle 6-2 sind die klassifizierten Produktgruppen aus Kapitel 2.1.1 (vgl. Abbildung 2-1) aufgelistet. Zudem sind die in Tabelle 6-1 aufgeführten Weiterverarbeitungsprozesse im Tabellenkopf aufgeführt. Durch diese Kombination und unter Anwendung der zuvor vorgestellten Methode ist es nun erstmals möglich, den jeweiligen Produkten entsprechende Prüfmethoden zuzuordnen. Die Zuordnung ist als Mindestprüfanforderung zu betrachten und bedarf einer zusätzlichen produktspezifischen „Fall zu Fall“-Überprüfung.

Tabelle 6-2: Klassifikation von Prüfmethoden auf die produktspezifischen Prozesse der Weiterverarbeitung als deren Mindestprüfanforderung

Produkt (Bsp. Produkt)	Stanzen/ Schneiden	Leichtes Tiefziehen	Starkes Tiefziehen	Rollen/ Biegen/ Schweißen	Biegen/ Falzen	Bördeln	Reibung/ Kratzen	Nahrungs- mittel/ Food
Kronkorken	Gitterschnitt Tesa-Test	Tiefung.	-	-	-	-	Ritzhärte	-
Verschlüsse (Nockendreh- verschluss)	Gitterschnitt Tesa-Test	-	Beta-Napf.	-	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	Sterilisation
Food-Dosen (Fischdose)	Gitterschnitt Tesa-Test	-	Beta-Napf.	-	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	Sterilisation
Getränkedosen	-	Tiefung.	-	-	-	T-Biege.	Ritzhärte	-
Tuben/ Hülsen (Hülse)	-	-	-	Dornbiege.	-	-	Ritzhärte	-
Flaschen (2-Teil)	Gitterschnitt Tesa-Test	-	Beta-Napf.	-	-	-	Ritzhärte	-
CT-Dosen	Gitterschnitt Tesa-Test	-	-	Dornbiege.	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	-
Aerosol	Gitterschnitt Tesa-Test	-	-	Dornbiege.	-	T-Biege.	Ritzhärte	-
Hobbocks	Gitterschnitt Tesa-Test	-	-	Dornbiege.	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	Sterilisation
Kanister	Gitterschnitt Tesa-Test	-	Beta-Napf.	-	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	-
Konservendose (Mantel)	Gitterschnitt Tesa-Test	-	-	Dornbiege.	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	Sterilisation
Fässer	Gitterschnitt Tesa-Test	-	-	Dornbiege.	Schlagfalt.	T-Biege.	Ritzhärte	Sterilisation

Tiefung.: *Tiefungsversuch*

Schlagfalt.: *Schlagfalttest*

Beta-Napf.: *Beta-Napf-Prüfung*

T-Biege.: *T-Biegeprüfung*

Dornbiege.: *Dornbiegeversuch*

Mit der hier vorgestellten Prozess-abhängigen Methode, die produktspezifischen Weiterverarbeitungsprozesse aufzugranulieren, um diesen dann entsprechende Prüfmethoden zuzuordnen, sowie der Durchführung dieser Methode zur Definition der Mindestprüfanforderungen in Tabelle 6-2, konnte dem in Kapitel 3 gesetzten wissenschaftlichen Ziel, einen kausalen Zusammenhang zwischen Prüfmethoden und Metallverpackung herzustellen, Rechnung getragen werden.

Eine alternative Methode zur Evaluierung des Umformverhaltens von Substraten mit aufgetragenen Beschichtungen beschreibt Ibis am Beispiel von Dehnungsmessstreifen. Dabei wurden Versagensarten des Beschichtungssystems bei Umformungsbelastungen Prozess-unabhängig untersucht [Ibis 2015]. Diese Methode könnte ausblickend weitere Aufschlüsse zur Definition von Mindestprüfanforderungen geben.

6.3 Wirkmechanismen einer UV-Vorbehandlung

In diesem dritten Teil von Kapitel 6 sollen die Wirkmechanismen der UV-Vorbehandlung interpretiert und diskutiert werden.

6.3.1 Photochemische Reaktionen durch UV-Strahlung

Die Versuche zur Vorbehandlung mittels Excimer-Strahler (vgl. Abschnitt 5.5.4) haben gezeigt, dass mittels einer UV-Vorbehandlung und besonders durch den Einsatz eines Excimer-Strahlers die Benetzungseigenschaften haftungsbegünstigend verändert werden können. Ferner konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Benetzungsveränderung dann am größten ist, wenn der Wellenlängenbereich der Strahlungsquelle abnimmt. Die in Abschnitt 5.5.6 vorgestellten Ergebnisse der XPS-Analyse haben zudem gezeigt, dass auf den Weißblechen diverse Kohlenstoffverbindungen vorliegen, welche über spezifische Bindungsenergien verfügen. Das bedeutet, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen der Einwirkung einer Strahlungsquelle im kurzwelligen UV-Bereich und der Modifikation von Kohlenstoffverbindungen durch ein Aufbrechen der Bindungsenergien besteht. Um diesen darstellen zu können, wird in einem ersten Schritt die vom Strahler emittierte Wellenlänge [nm] mittels Gleichung (6-1) in Elektronenenergie [eV] überführt [Pieke 2009, Riedel 2007].

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (6-1)$$

mit E Elektronenenergie
 h Plancksches Wirkungsquantum
 c Vakuumlichtgeschwindigkeit
 λ Wellenlänge
sowie N_A Avogadro-Konstante

Unter Einbeziehung der Avogadro-Konstante N_A wird in einem weiteren Schritt die Teilchenanzahl berücksichtigt, es ergibt sich die Einheit [kJ/mol]:

$$E = \frac{N_A hc}{\lambda} \quad (6-2)$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch anhand eines Schaubildes wie in Abbildung 6-9 darstellen, welches anschließend beschrieben wird.

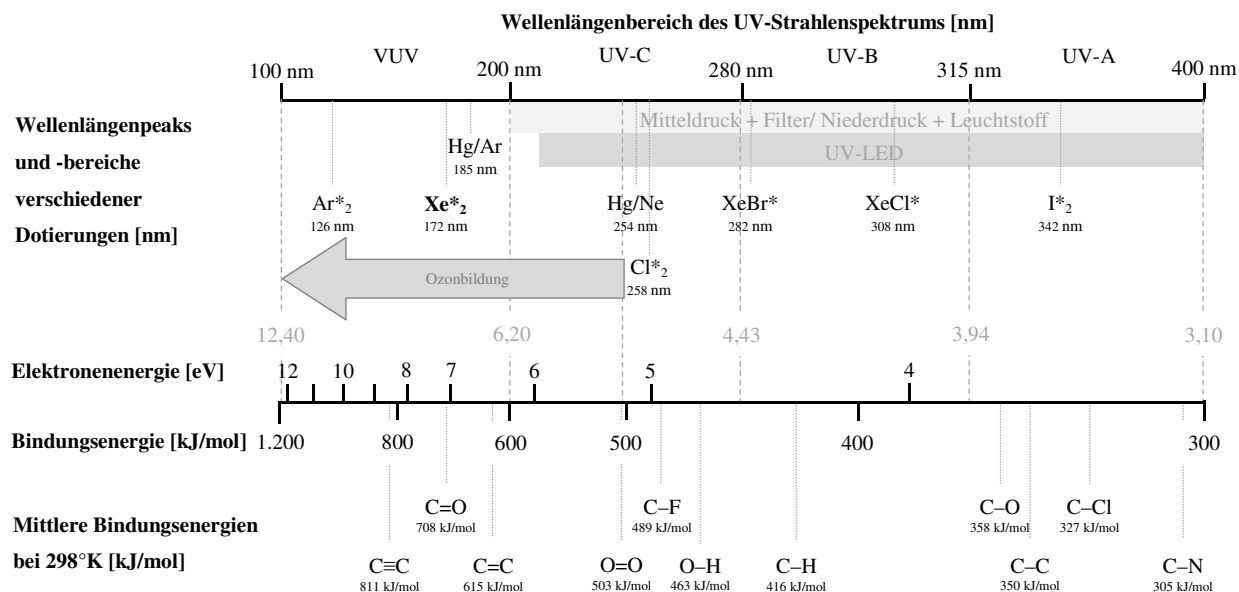


Abbildung 6-9: Der Wellenlängenbereich des UV-Strahlenspektrums mit aufgetragenen Wellenlängenpeaks einer Auswahl von UV-Strahlerdotierungen (Mittel-/ Niederdruck und UV-LED als Bereich) in Gegenüberstellung einer Skala zur Elektronen- und Bindungsenergie (in eV und kJ/mol) mit einer Auswahl aufgetragener Kohlenstoffverbindungen und Sauerstoff nach [Jüstel 2014, Mehnert 2017, Riedel 2007]

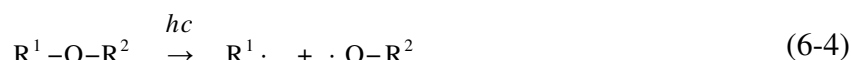
In der oberen Skala ist der Wellenlängenbereich [nm] des UV-Strahlenspektrums aufgetragen. Zudem sind Wellenlängenpeaks und -bereiche ausgewählter Strahlerdotierungen auf der Skala zu sehen. Die Anwendung der Formel (6-1) erlaubt eine Überführung auf die zweite Skala der Elektronenenergie [eV]. Unter weiterer Zuhilfenahme der Avogadro-Konstante mittels Formel (6-2) ergibt sich die Bindungsenergie [kJ/mol], welche auf der dritten Skala erkennbar ist. Zudem sind auf der unteren Skala die mittleren Bindungsenergien ausgewählter Kohlenstoff- und Sauerstoffverbindungen bei einer Temperatur von 298°K eingezeichnet [Riedel 2007]. Diese Zusammenhänge sind Teil der Photochemie, d. h. der durch Licht respektive Bestrahlung ausgelösten chemischen Reaktion, allgemein auch als Photolyse bezeichnet. Die in Abbildung 6-9 aufgetragenen Atompaare sind über Einfach- oder Doppelbindungen miteinander verbunden. Das Aufbrechen der Bindungspaare durch Photolyse wird als homolytischer Bindungsbruch bezeichnet und erzeugt Radikale [Regitz 1989].

Die homolytische Spaltung von O-Einfachbindungen durch Photolyse ist in Formel (6-3) und (6-4) dargestellt [Regitz 1989]:

mit	R^n	Organischer Rest
	O	Sauerstoffatom
	$R^n\cdot$	Organischer Rest mit Radikal
	$O\cdot$	Sauerstoffatom mit Radikal



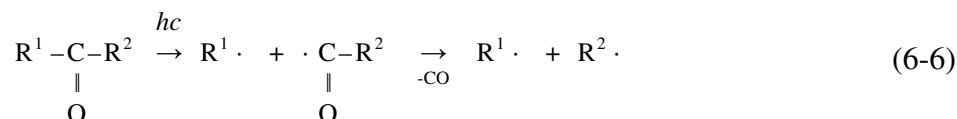
oder



Photochemisch angeregte C=O-Doppelbindungen (Carbonyl-Gruppe) können bei einer Bestrahlung mit $\lambda = 172 \text{ nm}$ dissoziiert werden und erzeugen ebenfalls Radikale [Regitz 1989]:



sowie bei geeigneten Ketonen [Regitz 1989]:



Bei der Verwendung von UV-Strahlungseinrichtungen ist ein Nebeneffekt die Bildung von Ozon [Koller 1952]. Der in der Atmosphäre vorliegende Sauerstoff wird durch die Einwirkung von UV-Strahlung ($< 240 \text{ nm}$) in Sauerstoffradikale dissoziiert, welche wiederum mit weiterem Sauerstoff Ozon bilden. Dies lässt sich wie folgt darstellen [Jüstel 2014]:



Die das Weißblech bedeckenden Moleküle (C_m , H_n , O_k) absorbieren die durch den Excimer-Strahler emittierte, kurzwellige UV-Strahlung. Voraussetzung hierfür ist, dass die Moleküle über entsprechende Absorptionsbande verfügen. Je geringer λ , desto größer ist der Absorptionskoeffizient. Dabei werden, in diesem Fall bei $\lambda = 172$ nm, durch die photolytische Spaltung organischer Einfach- und Doppelbindungen Radikale erzeugt. Gleichzeitig wird durch die Dissoziation von Sauerstoff bei $\lambda < 240$ nm Ozon erzeugt.

Aufgrund der so erzeugten Radikale kommt es zur Bildung leicht flüchtiger Molekülgruppen, wie CO_2 und H_2O sowie deren anschließende oxidative Degradation. Dieser Effekt wird durch die Anwesenheit von Ozon verstärkt [Vig 1992]. Eine Veranschaulichung der beschriebenen Vorgänge ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

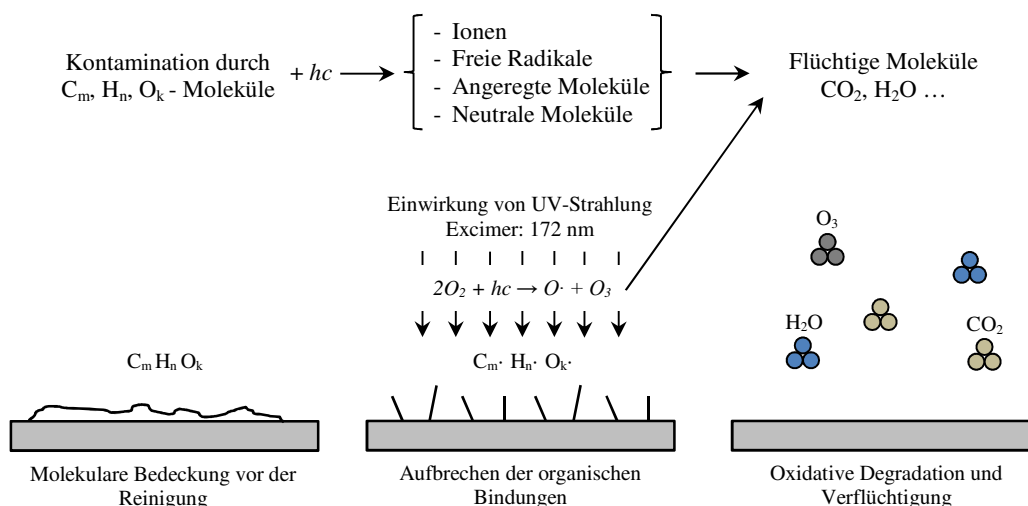


Abbildung 6-10: Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Reinigung kontaminierter Oberflächen mittels UV-Strahlung 172 nm nach [Mehnert 2018, Reinhardt 2008, Vig 1992]

Neben der hier untersuchten Einsatzmöglichkeit Weißbleche für den Blechdruck mittels UV-Strahlung zu reinigen und vorzubehandeln bzw. deren Oberflächeneigenschaften zu verändern, findet dieses Verfahren bereits Anwendung bei Kunststoffen [Gotoh 2004, Kuang 2015] oder der Reinigung von Silizium-Wafern [Reinhardt 2008]. Des Weiteren existieren biochemische Anwendungen zur Desinfektion von Wasser, Luft und Oberflächen [Jüstel 2014].

6.3.2 Veränderung des Kontaktwinkels mittels UV-Strahlung

Die Versuche zur Benetzungsveränderung in Abschnitt 5.5.4 haben ergeben, dass die Veränderung des Kontaktwinkels durch UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Einwirkdauer steht. Hierbei stellt sich die Frage, ob es in der Vergangenheit bereits ähnliche Versuche gab. Auffällig ist, dass bei vielen Untersuchungen mit ähnlichem Versuchsaufbau Vorbehandlungszeiten > 1 Min. gewählt wurden [Özcam 2014, Wang 2017]. Einen vergleichbaren Versuchsaufbau wählte Gotoh 2004 mit einem 172 nm Excimer-Strahler für die Materialien Polyethylen und Polyethylenterephthalat bei Einwirkzeiten zwischen 0 und 90 Sekunden. Auch Kuang 2015 hat bei Untersuchungen von Polyurethan mit vergleichbaren Einwirkzeiten von 0 bis 600 Sek. unter Verwendung einer UV-Strahlungseinrichtung mit 184,9 und 253,7 nm durchgeführt. Beide Untersuchungen sowie die gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit sind in Abbildung 6-11 in vergleichbarer Form dargestellt, um die Kontaktwinkelveränderungen mittels UV-Strahlung charakterisieren zu können.

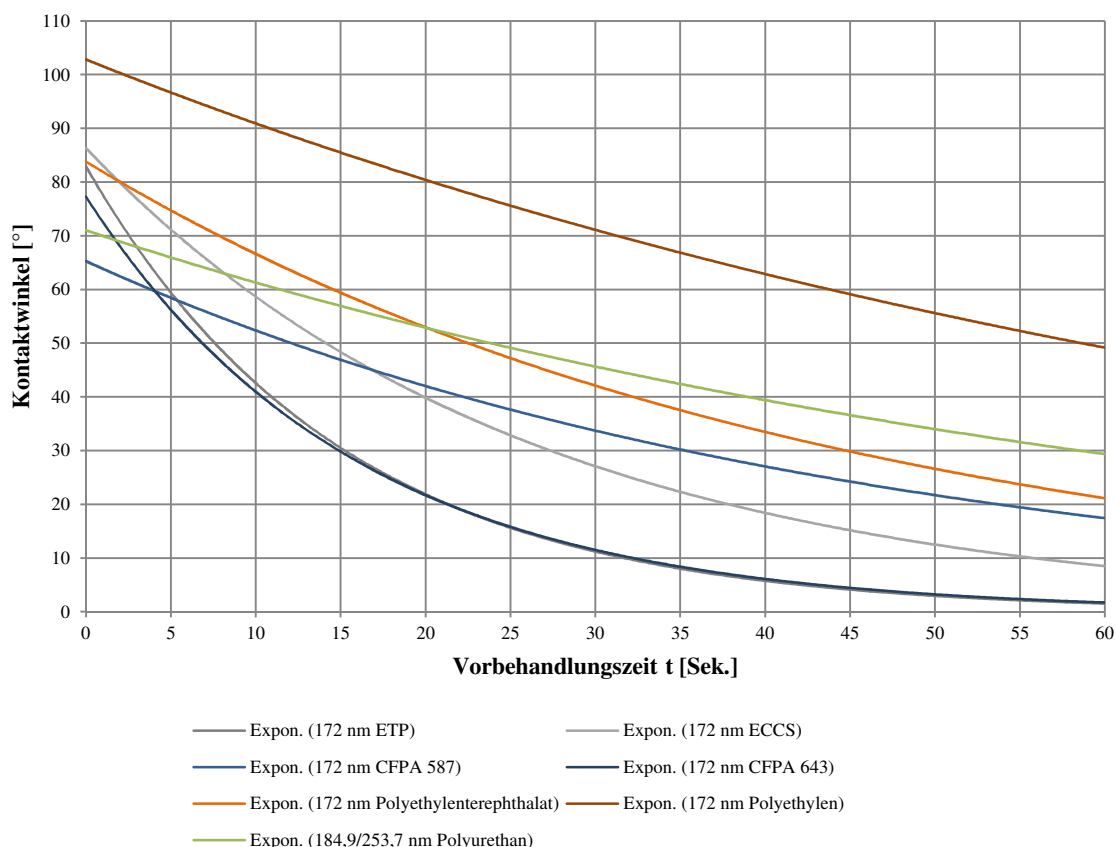


Abbildung 6-11: Vergleich der Kontaktwinkelveränderung mittels UV-Strahlung auf verschiedenen Weißblechen (Ergebnisse dieser Arbeit) und Kunststoffen [Gotoh 2004 (Polyethylen und Polyethylenterephthalat), Kuang 2015 (Polyurethan)] als exponentielle (Expon.) Trendliniendarstellung

Die zur Verfügung stehenden Werte für Weißbleche dieser Arbeit sowie für Kunststoffe von Gotoh 2004 und Kuang 2015 wurden aufgrund des regressiven Grundcharakters in exponentielle Trendlinienverläufe überführt, welche die Y-Achse jeweils am unbehandelten Kontaktwinkelniveau schneiden. Mit dieser Darstellung kann nun gezeigt werden, dass auch bei verschiedenen Substraten (Weißblechen und Kunststoffen) eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften mittels UV-Strahlung (und Ozoneinwirkung) stattfindet. Interessanterweise wurden bei vielen Untersuchungen Bestrahlungszeiträume > 1 Min. gewählt. Dem entgegen findet die wesentliche Veränderung des Kontaktwinkels bereits in den ersten 30 Sek. der UV-Strahleneinwirkung statt. Diese Aussage ist in Tabelle 6-3 verdeutlicht. Für die X-Achsenwerte 5, 10 und 30 Sek. stehen hierfür die meisten vergleichbaren Messwerte zur Verfügung. Aufgeführt sind die relativen Veränderungen [%] der Kontaktwinkel $[\circ]$ zum Eingangsniveau der jeweiligen Weißbleche/ Kunststoffe.

Tabelle 6-3: Relative Abnahme des Kontaktwinkels [%] durch UV-Strahlungseinwirkung nach 5, 10 und 30 Sek. auf verschiedenen Weißblechen/ Kunststoffen

Weißblech/ Kunststoff	Wellenlängenbereich der Strahlungsquelle [nm]	Relative Abnahme [%] des Kontaktwinkels $[\circ]$ nach 5, 10 und 30 Sek. Bestrahlungsdauer		
		5 Sek.	10 Sek.	30 Sek.
Polyurethan	184,9/ 253,7	-	-31 %	-
Polyethylen	172	-23 %	-25 %	-38 %
Polyethylenterephthalat	172	-43 %	-52 %	-67 %
ETP	172	-22 %	-58 %	-86 %
ECCS	172	-12 %	-34 %	-72 %
CFPA 587	172	-5 %	-28 %	-
CFPA 643	172	-41 %	-72 %	-68 %

Ausblickend zu diesem Thema empfiehlt sich eine weitere Untersuchung mit verschiedenen Substraten und standardisiertem Versuchsaufbau, wie definiertem Strahlungsquellenabstand zum Substrat, gleicher Strahlungsquelle und Bestrahlungszeiten ≤ 1 Min., um die photochemische Wirkung von UV-Strahlung in Bezug zur Kontaktwinkelveränderung respektive als mögliches Vorbehandlungsverfahren für Beschichtungsprozesse tiefergehend zu evaluieren.

7. Konzeptionelle Folgerungen

In diesem Kapitel sollen nun, auf Basis der durch die Versuche gewonnenen Erkenntnisse, die konzeptionellen Folgerungen vorgestellt und diskutiert werden.

Um den Unterschied zwischen einer Linienkonfiguration und einer Produktionslinie zu verdeutlichen werden folgenden Begrifflichkeiten festgelegt:

- Linienkonfiguration: Zusammenfassung verschiedener Produktionslinien mit deren eine vollständige beidseitige Lackierung und Bedruckung von Weißblech erzielt wird (vgl. Abschnitt 2.5.3).
- Produktionslinien: Zusammenfassung von Lackier- und/ oder Druckmaschinen sowie verschiedenen Aggregaten zu einem Linienverbund zur einseitigen Lackierung und/ oder Bedruckung von Weißblech (vgl. Abschnitt 2.5).
- Maschinen: Baugruppenverbund mit welchem Lackier- und/ oder Druckprozesse durchgeführt werden (Druckmaschine, Lackiermaschine).
- Aggregate: Teilkomponenten einer Produktionslinie, welche vornehmlich Trocknungs- und Transportprozesse durchführen (UV-Trockner, Stapelung, Sheet Management System, Trockner).

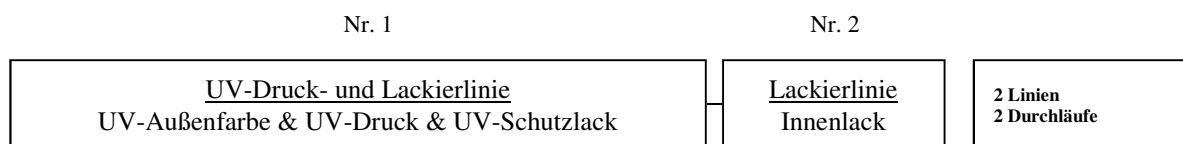
In Abschnitt 7.1 wird aus dieser Arbeit resultierende Linienkonfiguration vorgestellt, mit der Weißblechtafeln innerhalb von zwei Liniendurchläufen vollständig bedruckt und lackiert werden kann. Aus der vorgestellten Linienkonfiguration ergeben sich zwei mögliche Produktionslinien. Diese werden in Abschnitt 7.2 näher beschrieben und vorgestellt. Da für den Auftrag der Außenlackierung in den vorgestellten Varianten UV-basierte Farben verwendet werden sollen, werden in Abschnitt 7.3 mögliche Farbwerkskonfigurationen diskutiert. Abschließend erfolgt in Abschnitt 7.4 ein Überblick zu den Einsatzmöglichkeiten für die erarbeiteten Produktionslinien der Linienkonfiguration.

7.1 Linienkonfiguration

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Linienkonfiguration zu entwerfen, mit dem die Durchläufe der Weißblechtafeln reduziert werden können. Den Ansätzen von McHugh und Ludin (vgl. Abschnitt 2.5.4) folgend soll hierbei der Einsatz UV-härtender Farben berücksichtigt werden. Die vorgeschlagene Linienkonfiguration ist in Abbildung 7-1 dargestellt und im Folgenden beschrieben.

7.1.1 UV-Linienkonfiguration

Abbildung 7-1 zeigt die vorgeschlagene UV-Linienkonfiguration mit zwei Produktionslinien (Nr. 1: UV-Druck- und Lackierlinie, Nr. 2: Lackierlinie), um Weißblech für Metallverpackungen mit allen notwendigen Lackier- und Druckprozessen zu bedrucken.



**Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der UV-Linienkonfiguration mit zwei Liniendurchläufen;
Produktionslinie Nr. 1: UV-Druck- und Lackierlinie, Produktionslinie Nr. 2.: Lackierlinie**

Die vorgeschlagene UV-Linienkonfiguration besteht aus zwei separaten Produktionslinien. In der ersten Produktionslinie durchlaufen die Weißblechtafeln eine UV-Druck- und Lackierlinie (vgl. Abbildung 7-1 Nr. 1) und werden mit einer (weißen) Außenfarbe, dem Druck und dem Schutzlack auf der Außenseite versehen. Für die drei Aufträge ist jeweils die Verwendung UV-härtender Lacke und Farben vorgesehen.

Innerhalb der Produktionslinie Nr. 1 ist zum Auftrag der Außenfarbe ein Grundierwerk oder eine Grundiermaschine vorgesehen, welche innerhalb der Linie angeordnet ist und mit der eine erste weiße oder klare Schicht auf das Weißblech aufgetragen wird. Dies ist auch der wesentliche Unterschied zum Stand der Technik. Anschließend erfolgt nach dem Stand der Technik der Druck des Druckbildes sowie abschließend der Auftrag des Schutzlacks.

Haben die Weißbleche die erste Produktionslinie passiert, sind diese in einem Stapelwender zu umstülpen, um anschließend der Produktionslinie Nr. 2, der Lackierlinie (vgl. Abbildung 7-1, Nr. 2), zugeführt zu werden. In der Lackierlinie wird die Innenseite mit einem auf das Füllgut abgestimmten thermisch trocknenden Lack versehen. Haben die Weißbleche auch die zweite Produktionslinie passiert, sind alle erforderlichen Schichten aufgetragen. Aufgrund der

im Trocknungssofen stattfindenden Umstülpung liegen die Tafeln im Anschluss mit der Außenseite nach oben zur Weiterverarbeitung bereit.

Vorteil der UV-Linienkonfiguration

Unabhängig der Ausführungsvariante der Produktionslinie Nr. 1 ergibt sich ein wesentlicher Vorteil der hier vorgestellten UV-Linienkonfiguration. In erster Linie wird der Zweck verfolgt, die Herstellungskosten für Metallverpackungen zu reduzieren. Der Ansatz dieser Arbeit ist es, die notwendigen Liniendurchläufe durch die Zusammenführung der Aufträge auf der Produkt-Außenseite zu reduzieren. Dadurch würde der heute notwendige Tafeldurchlauf einer Lackierlinie zum Auftrag des Außenlacks entfallen. Aufgrund dessen könnten Anwender sowohl die Zeit zur Herstellung, Personal und auch Betriebskosten reduzieren. In welchem Umfang sich dieses Einsparpotenzial bewegt, ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und ausblickend zu überprüfen.

Ausführungsvarianten der Produktionslinie Nr. 1

In Abschnitt 2.5.2 und wurde bereits dargestellt, dass Blechdruckmaschinen sowohl für planen als auch rotativen Tafeltransport ausgelegt sein können. Beide Varianten unterscheiden sich dabei vornehmlich in der maschinenbaulichen Ausführung des Tafeltransportes und, damit verbunden, auch in der Höhe des jeweiligen Investitionsvolumens für den Anwender und in den möglichen produktspezifischen Einsatzbereichen. Aus diesem Grunde werden in Abschnitt 7.2 auch beide Ausführungsvarianten der Produktionslinie Nr. 1 vorgestellt, welche jeweils dem Ziel folgen: Die Außenseite in einem Liniendurchlauf mit Außenfarbe, Druck und Schutzlack zu versehen. Aufgrund der maschinenbaulichen Unterschiede der beiden Varianten (plan/ Greiferschluss) ergeben sich Unterschiede bei der Produktionsleistung, den Rüstzeiten respektive des Nutzungsgrades, den produktspezifischen Einsatzbereichen, den möglichen Investitionskosten sowie im Maschinenstundensatz. Diese Punkte sind jedoch nicht Anspruch dieser Arbeit und damit ausblickend zu evaluieren.

Separate Innenlackierlinie I (vgl. Abbildung 7-1 Nr. 2): Produktionsleistung

Es stellt sich die Frage, ob auch die Lackierlinie (Nr. 2) mit der UV-Druck- und Lackierlinie (Nr. 1) zusammengefasst werden könnte, um eine „One-Pass-Productivity“ (Durchführung aller Aufträge in einem Liniendurchlauf) zu erzielen. Hier sprechen mehrere Gründe dagegen.

Es ist bekannt, dass das Verhältnis der verwendeten Innen- zu Außenlacken ca. 8:1 beträgt [Massa 2016], da jedes Füllgut einen eigens abgestimmten Innenlack benötigt. Dadurch würden an einem integrierten Lackwerk für Innenlackierungen sehr häufig Lackwechsel anfallen, welche den Nutzungsgrad einer solchen Produktionslinie rapide einschränken würden. Für die Außenlackierung hingegen finden lediglich zwei (Haupt-)Lackvarianten Anwendung: Weiß- und Klarlack. Fluidwechsel und Reinigungsprozesse bewegen sich in ihrer Häufigkeit daher in einem akzeptablen Rahmen.

Separate Innenlackierlinie II (vgl. Abbildung 7-1 Nr. 2): Migrationspotential der Photoinitiatoren

Als ein weiterer Punkt, welcher gegen die Einbeziehung der Innenlackierung spricht, seien die in UV-basierten Farb-/ Lacksystemen vorliegenden Photoinitiatoren genannt. Grundsätzlich ist nicht sicher gestellt, dass die Photoinitiatoren immer vollständig dem Polymerisationsprozess unterliegen und aufgrund der UV-Strahleneinwirkung angeregt werden. Aufgrund der geringen atomaren Masse mit Molekulargewichten zwischen 120 – 380 u besitzen Photoinitiatoren ein erhöhtes Migrationspotenzial [Huber o. J.]. Daher sollte der Innenlackauftrag in einer separaten Linie verbleiben und nicht „Inline“ erfolgen. Darüber hinaus ist die Prozessreihenfolge der Linie so zu gestalten, dass die Innenlackierung als letzter Beschichtungsauftrag vorgenommen wird, da mit diesem ein thermischer Trocknerdurchlauf erfolgt, mit dem die in den UV-Aufträgen enthaltenen Photoinitiatoren restlos aktiviert bzw. ausgetrieben werden können [Nestlé 2014].

Separate Innenlackierlinie III (vgl. Abbildung 7-1 Nr. 2): Verbesserte Nachhärtung

Unter der Annahme, dass im Anschluss (nach dem hier vorgestellten Konzept) der außenseitigen Schichtaufträge die Innenlackierung durch thermisch trocknenden Lack in einem weiteren Liniendurchlauf durchgeführt wird, wirkt die durch den Trockner hervorgerufene Wärmeeinwirkung positiv auf den Nachhärtungsprozess der UV-Schichtaufträge. Die Erwärmung wirkt wie eine Art Katalysator, welcher die Polymerisation weiter vorantreibt. Das Ergebnis ist eine verbesserte Adhäsion [Dowbenko 1983].

7.1.2 Randbedingungen zum Auftrag der weißen Grundierschicht

Im Folgenden werden einige Randbedingungen und Erkenntnisse zum Auftrag der weißen Grundierschicht, welche aus den Untersuchungen dieser Arbeit entstanden sind, diskutiert.

Weißauftrag

Die für das Grundierwerk oder die Grundiermaschine bestimmten Aufträge sind entweder klar oder weiß. Die Untersuchungen haben sich ausschließlich auf weiße UV-Farben beschränkt. Die weiße Grundierschicht soll dabei den Kontrast des Druckbildes erhöhen, um damit auch die Brillanz zu erhöhen. D. h., dass die folgenden Überlegungen zu Farbwerkskonfigurationen (siehe Abschnitt 7.3) ausschließlich dem Zweck eines homogenen Weißauftrags auf Weißblech Rechnung tragen sollen.

Verzicht auf Berücksichtigung eines Vorbehandlungsverfahrens

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Untersuchung einer UV-Vorbehandlung zur Verbesserung der Haftung von UV-basierten Farbsystemen auf Weißblechen. Der abschließende Vergleich der Gitterschnitt-Kennwerte der verschiedenen Weißbleche in Abschnitt 6.1.1 (Abbildung 6-2) zeigt, dass die Materialpaarung von CFPA-Weißblechen mit einer optimierten UV-Farbe auch ohne den Einsatz einer Vorbehandlung zu einer vollkommen fehlerfreien Haftung führt. Auf Basis dieser Ergebnisse wird daher auf die Berücksichtigung des Prozesses der Vorbehandlung innerhalb der konzeptionellen Folgerungen vollständig verzichtet.

Grundiermaschine vs. Grundierwerk

Für die beiden im Detail vorgestellten Varianten der Produktionslinie (Abschnitt 7.2) kommen entweder eine Grundiermaschine (für den planen Tafeltransport) oder ein Grundierwerk (für den Tafeltransport mit Greiferschluss) zum Tragen. Die Grundiermaschine ist dabei eine separate Anlage, welche mit den übrigen Aggregaten und der Druckmaschine den Linienverbund bilden. Das Grundierwerk hingegen ist eine in die Druckmaschine integrierte Baugruppe.

Grundierwerk

Für den Auftrag des Außenlacks wird typischerweise eine Lackiermaschine verwendet. Da das für die Untersuchung verwendete Fluid kein niedrig viskoser Lack, sondern eine hoch viskose Farbe ist, ist bislang unbekannt, ob das bestehende Lackierwerk der Lackiermaschine geeignet ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden für das Aggregat, welches den Außenlack aufträgt, der Begriff Grundierwerk (respektive Grundiermaschine) verwendet.

Auftragsstärke von UV-Weißfarben

Bei der Verwendung von UV-härtenden Weißfarben besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen unzureichendem Haftvermögen und dem breiten Remissionsspektrum des in den Farben enthaltenen Pigments Ti_2O . Dieses behindert ein Eindringen des UV-Lichtes bei der Bestrahlung der Farbschicht [Dowbenko 1996]. Bei einem Farbauftrag von $8\text{--}9 \text{ g/m}^2$ werden die enthaltenden Photoinitiatoren zwar zur Vernetzung angeregt. Jedoch härtet bei diesen Schichtdicken lediglich die Farboberfläche, der Schichtgrund bleibt weich, da die UV-Strahlung die Schicht nicht vollständig durchdringen kann [KBA 2002]. Somit entstehen im Zuge der Polymerisation inhomogene Zonen in der Auftragsschicht, in denen die Adhäsion weniger stark ausgeprägt ist und die Haftung somit negativ beeinträchtigt wird [Meichsner 1997, Negele 1996, Sato 1980].

Adhäsion strahlungshärtender Fluide auf nicht saugfähigen Substraten

Das Beschichten kaltgewalzter Weißbleche für Metallverpackungen stellt hohe Anforderungen an eine Kombination unterschiedlicher Farbeigenschaften. Im Besonderen kommt der Adhäsion zwischen UV-Farbe und Weißblech im Hinblick auf nachfolgende Umformungsprozesse und thermische Behandlungen eine signifikante Bedeutung zu. Es hat

sich gezeigt, dass die Adhäsion strahlungshärtender Fluide auf nicht saugfähigen Substraten oftmals unzureichend ist. Eingeschränkte Flexibilität durch hohe Vernetzungsdichten in der Beschichtung [Roose 2009] können unter anderem ein Grund für eine unzureichende Adhäsion sein, insbesondere in den nachgelagerten Weiterverarbeitungsprozessen.

Sonstige Anmerkungen

Die hier vorgestellten Linienkonzepte beziehen sich ausschließlich auf die Substratform Tafelware respektive Scrollware. Der Einsatz von Bandware ist nicht berücksichtigt, da hierfür ein gänzlich anderes Konzept notwendig wäre.

In den nachfolgenden Abschnitten 7.2.1 für den planen Tafeltransport und 7.2.2 für den Tafeltransport mittels Greiferschluss werden beide Varianten vorgestellt.

7.2 Varianten der Produktionslinien

In diesem Abschnitt werden zwei Varianten der UV-Druck- und Lackierlinie näher vorgestellt und im Detail beschrieben.

7.2.1 Produktionslinie mit planen Tafeltransport

Die erste Variante der Produktionslinie befasst sich mit der Ausführung hinsichtlich eines plan liegenden Tafeltransportes. Es ist als Produktionslinie zu charakterisieren, da erst die einzelnen Anlagen, Aggregate und Komponenten einen Systemverbund bilden. In der nachfolgenden Abbildung 7-2 ist die Variante für den planen Tafeltransport schematisch dargestellt:

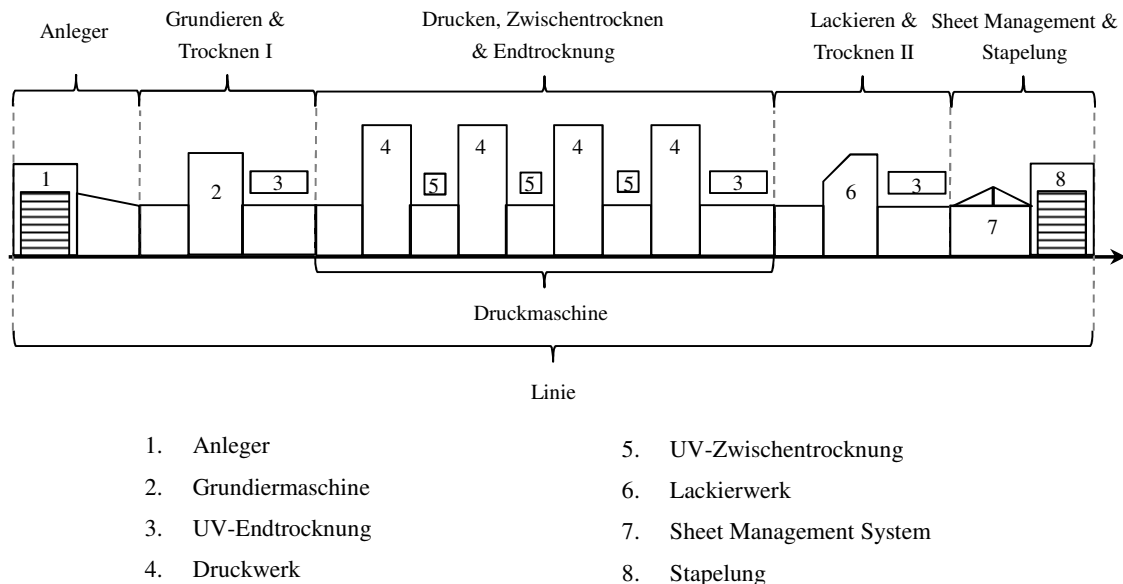


Abbildung 7-2: Produktionslinie mit planem Tafeltransport [eigene Darstellung]

Die vorliegende Variante einer Produktionslinie für den planen Tafeltransport ist mit dem Vorschlag von McHugh (vgl. Abschnitt 2.5.4, Abbildung 2-29) vergleichbar. Im Unterschied zu McHugh besitzt dieser Vorschlag eine Liniencharakteristik, da keine zusammenhängende Maschine vorliegt, sondern eine Vielzahl von Einzelanlagen und -aggregaten aneinander gereiht sind, welche bereits größtenteils baulich realisiert und im Einsatz befindlich sind. Die beteiligten Aggregate und Anlagen sind der Anleger (1), eine Grundiermaschine (2) mit UV-Trocknungsarray (3) für die Basisfarbe, die Druckmaschine mit UV-Zwischen- und Endtrocknung, eine Lackiermaschine (6) mit UV-Endtrocknung für den Schutzlackauftrag sowie ein Sheet Handling System (7) und eine Stapelungsvorrichtung (8). Die wichtigsten werden im Folgenden beschrieben.

Anleger

Zur Vereinzelung der Tafeln wird ein Schuppenanleger vorgeschlagen, bei dem die Tafeln in einer relativ langsamen Geschwindigkeit vom Stapel in die Linie geführt werden. Anschließend ist es notwendig, die Schuppe aufzulösen und die Tafeln separat so zu beschleunigen, dass keine Tafelüberlappung mehr vorliegt.

Grundieren & Trocknen (Grundiermaschine)

Für diese Produktionslinie ist eine separate Grundiermaschine vorgesehen, welche mit den übrigen Aggregaten und der Druckmaschine den Linienverbund bildet. Für den Auftragsprozess der UV-Außenfarbe ist ein konventionelles 3-Walzen-Lackierwerk (Abbildung 2-25) ggf. ungeeignet, da dieses für Fluide mit niedriger Viskosität ausgelegt ist, jedoch die parallele Farbentwicklung dieser Arbeit eine hochviskose Farbe hervorgebracht hat. Eine Analyse von Bergs 1998 zur Erzeugung und Dosierung dünner Flüssigkeitsschichten auf Walzen ergab bei einem korrespondierenden Lackwerktyp, dass es sich zwar um eine robuste Technik mit einfacher Bedienung und hoher Lackwerksdynamik handelt. Im Gegenzug ist die Dosierung aber viskositäts- und geschwindigkeitsabhängig. Des Weiteren können vornehmlich niedrige Viskositäten mit einer Auslaufzeit bis 50 Sek./ 4 mm Ø verarbeitet werden [Berg 1998]. Ferner gilt es zu beachten, dass bei dem Auftrag der Basisfarbe die aufgetragene Schichtdicke von 4,5 - 5,0 µm nicht überschritten werden darf, da dies sonst zu einer unzureichenden Durchhärtung der UV-Farbschicht führen würde. In Abschnitt 7.3 wird auf mögliche Farbwerkstypen weiter eingegangen.

Drucken, Zwischentrocknen & Endtrocknung

Für den plan liegenden Tafeltransport besteht im Druckprozess die Notwendigkeit, die Tafeln vor jedem Druckwerk in einer separaten Anlage auszurichten. Dadurch ist die allgemeine Produktionsleistung der Linie auf 7.500 Tafeln/Std. [KBA 2019] limitiert. Nach jedem Druckwerk ist, gemäß dem Stand der Technik, ein einzelner UV-Strahler zur Zwischenhärtung vorgesehen. Nach dem letzten Druckwerk folgt eine UV-Endtrocknung mit einem Strahlerarray mit vier UV-Strahlern.

Lackieren & Trocknen II

Zum Auftrag des Schutzlacks wird ein typisches 3-Walzen-Lackierwerk vorgeschlagen. Die Auslegung folgt hierbei dem bekannten Stand der Technik und sieht nach dem Auftrag eine UV-Endtrocknung mit vier UV-Strahlern vor.

Sheet Management & Stapelung

Den Abschluss der Linie bilden die Aggregate Sheet Management System und Stapelung, welche benötigt werden, um Makulatur, Kontrolltafeln und Guttafeln ausschleusen zu können.

7.2.2 Produktionslinie mit Greiferschluss

Bei dieser Variante einer Produktionslinie wird der Tafeltransport durch Greiferschluss realisiert, um damit höhere Produktionsgeschwindigkeiten gewährleisten zu können. Die hier vorgestellte Variante der UV-Druck- und Lackierlinie ist in der nachfolgenden Abbildung 7-3 schematisch dargestellt:

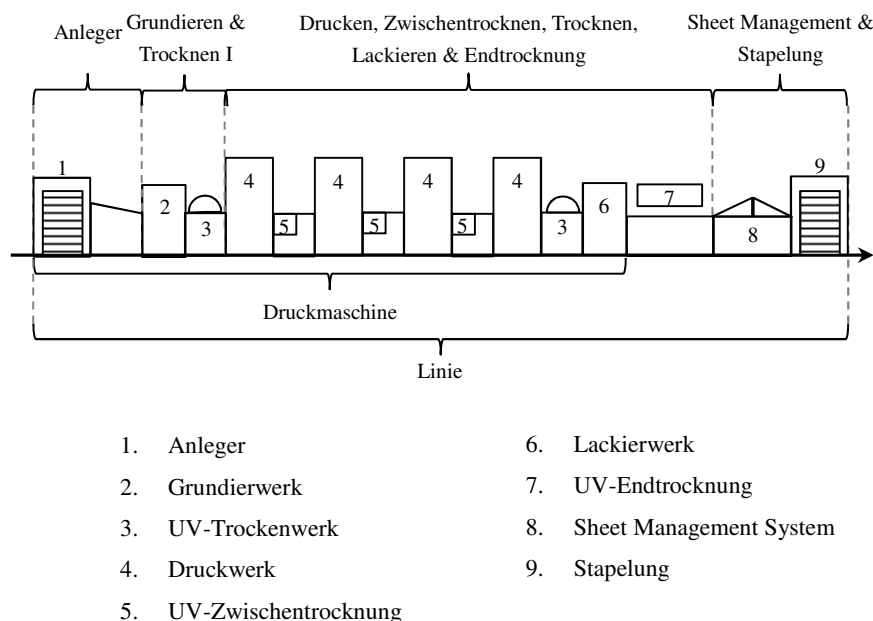


Abbildung 7-3: Produktionslinie mit rotativem Tafeltransport [eigene Darstellung]

Basis dieser Linie ist eine Bogendruckmaschine, wie sie für das Verdrucken von Papier und Karton verwendet wird. Durch bauliche Veränderungen des Unterbaus, also der substratführenden Baugruppen, ist es möglich, Weißblechtafeln durch die Druckmaschine zu transportieren. Ein Beispiel dafür ist die MetalStar 3 der Koenig und Bauer AG.

Lediglich die UV-Endtrocknung (7), das Sheet Management System (8) und die Stapelung (9) sind dem Stand der Technik folgend als einzelne Aggregate ausgeführt. Um Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu ~10.000 Tafeln/Std. gewährleisten zu können, werden bei diesem Maschinentyp die Tafeln vornehmlich mittels Greiferschluss geführt. Die der Druckmaschine zuzuordnenden Baugruppen sind der Anleger, ein Grundierwerk mit UV-Trockenwerk, die Druckwerke mit integrierten UV-Interdecks zur Zwischentrocknung, ein weiteres UV-Trockenwerk sowie ein Lackierwerk. Anschließend wird der Greiferschluss gelöst und der Tafeltransport erfolgt planliegend über Riemen oder Vakuumbänder durch eine UV-Endtrocknung und dem Sheet Management System bis zur abschließenden Stapelung.

Anleger

Analog zur Variante 1 kommt wieder ein Schuppenanleger zur Vereinzelung der Tafeln zum Einsatz.

Grundierwerk

Es wird vorgeschlagen, das Grundierwerk zum Auftrag der UV-Außenfarbe als Baugruppe zu konzipieren. Auch hier sind weitere Überlegungen notwendig, um die Auftragsstechnik so auszuführen, dass hochviskose Fluide verdruckt werden können. In Abschnitt 7.3 wird auf mögliche Farbwerkskonfigurationen näher eingegangen. Da der Greiferschluss für den Tafeltransport mit dem Grundierwerk beginnt, ist es notwendig, die Tafeln des eintreffenden Schuppenstroms an den Vorder- und Seitenmarken auszurichten. Entsprechende Funktionen müssen daher am Grundierwerk berücksichtigt werden.

UV-Trockenwerke

Zur Härtung der UV-Außenfarbe sowie der UV-Druckfarben wird der Einsatz von UV-Trockenwerken vorgeschlagen. Diese bereits im Einsatz befindlichen Baugruppen führen das Weißblech im Greiferschluss an fest verbauten UV-Trocknungsarrays vorbei. Der Vorteil der Trockenwerke ist, dass es sich dabei um Baugruppen handelt, mit deren wesentlich höhere Produktionsgeschwindigkeiten erzielt werden können. Im Gegensatz zu Trocknungsstrecken mit planliegendem Tafeltransport über Vakuumbänder ist das Investitionsvolumen von Trocknungswerken aber deutlich höher.

Druckwerke mit UV-Interdecks

Die Baugruppen der Druckwerke mit integrierten UV-Interdecks orientieren sich an dem Stand der Technik, bei dem das Weißblech mittels Greiferschluss an den einzelnen Druckstellen vorbeigeführt wird. Die vorgeschlagene Druck- und Farbwerkstechnik entspricht ebenfalls dem Stand der Technik. UV-Interdecks sind UV-Strahler, welche als modulare Baugruppen ausgeführt sind und über Einschübe der Maschine zu z. B. Wartungszwecken einfach entnommen werden können.

Lackierwerk

Für den Auftrag des UV-Schutzlacks wird vorgeschlagen, einen konventionellen Lackwerkstyp (siehe Abbildung 2-25) zu verwenden. Um dieser Ausführungsvariante der Produktionslinie Rechnung zu tragen, bestünde die konstruktive Aufgabenstellung darin, das Lackwerk der Lackiermaschine in eine integrative Baugruppe zu überführen. Alternativ ist auch denkbar, anstelle der vorgeschlagenen Baugruppe eine Lackiermaschine zu verwenden. Dadurch würde die Maschine bereits nach den Druckwerken enden und als Linie fortgeführt werden. Eine abschließende Bewertung beider Möglichkeiten sollte ausblickend durchgeführt werden.

UV-Endtrocknung

Mit der UV-Endtrocknung beginnt der plan liegende Tafeltransport. Die Auslegung folgt hierbei dem bekannten Stand der Technik und sieht nach dem Auftrag des UV-Schutzlacks eine UV-Endtrocknung mit vier UV-Strahlern vor.

Sheet Handling & Stapelung

Den Abschluss der Linie bilden die Aggregate Sheet Management System und Stapelung, welche benötigt werden, um Makulatur, Kontrolltafeln und Guttafeln ausschleusen zu können.

7.3 Farbwerkskonfiguration des Grundierwerks

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit hat sich ergeben, dass das direkte Bedrucken von Weißblechen mit UV-basierenden Farben realisierbar ist. Jedoch sind bei den hervorgegangenen UV-Farben die rheologischen Eigenschaften so ausgeprägt, dass die Verdruckbarkeit mit konventionellen Lackierwerken noch zu prüfen ist. Die im Einsatz befindlichen Lackwerktypen (3-Walzen-Lackierwerk) sind in erster Linie für niedrigviskose Lacke ausgelegt. Da es sich bei der neu entwickelten Farbe um ein hochviskoses Fluid handelt, sind konzeptionelle Überlegungen im Hinblick auf mögliche Beschichtungssysteme notwendig.

Die für das Grundierwerk oder die Grundiermaschine bestimmten Aufträge sind entweder klar oder weiß. Die Untersuchungen haben sich ausschließlich auf weiße UV-Farben beschränkt.

Die weiße Grundierschicht soll dabei den Kontrast des Druckbildes erhöhen, um damit auch die Brillanz zu erhöhen. D. h., dass die folgenden Überlegungen zu Farbwerkskonfiguration ausschließlich dem Zweck eines homogenen Weißauftrags auf Weißblech Rechnung tragen sollen.

Dazu sind zuerst die an die Beschichtungstechnik gestellten Anforderungen zu betrachten. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei dem Fluid um eine hochviskose Farbe (Werte unbekannt), die zudem mit definierten Schichtdicken von 4 – 5 μm sowie mit einer größtmöglichen Homogenität aufgetragen werden soll. Bei den Aufträgen der Außenbeschichtung handelt es sich ausschließlich um Vollflächen, bei denen zudem lokale Aussparungen in Form von ca. 3 – 8 mm starke Längs- und Querlinien vorliegen, welche von Produktion zu Produktion in ihrer Position auf der Tafel schwanken (vgl. Abschnitt 2.1.2). Diese Längs- und Queraussparungen zwischen den einzelnen Nutzen sind notwendig, um einen einwandfreien Schweißprozess bei der Zylinderformung zu gewährleisten. Dieser Umstand macht es notwendig, eine Funktion für wechselbare Druckformen zu berücksichtigen.

7.3.1 Druckwerk

Bei den folgenden Überlegungen wird grundsätzlich zwischen einem direkten und einem indirekten Auftrag auf das Weißblech unterschieden. Kernmerkmal für eine Unterscheidung ist die Lage der Druckform. Während bei dem direkten Auftrag direkt von der Druckform das Weißblech bedruckt wird, ist bei der indirekten Variante ein weiterer Zylinder zwischen Druckform und Weißblech vorliegend. Beide Varianten sind in Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 schematisch dargestellt.

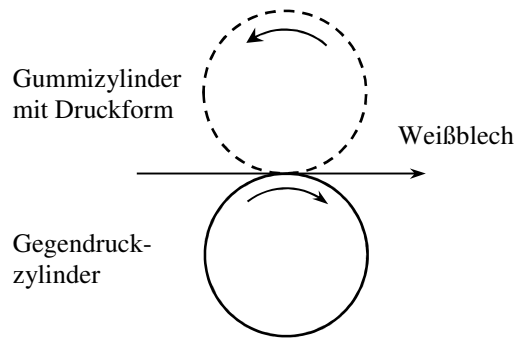
Direkt

Abbildung 7-4: Schematische Darstellung direkter Auftrag nach [Kipphan 2000, Techner 1991]

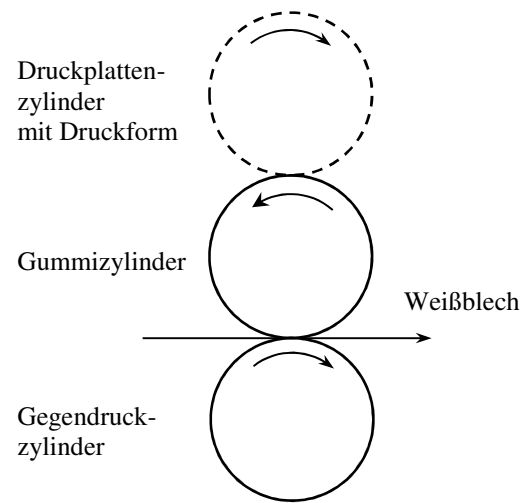
Indirekt

Abbildung 7-5: Schematische Darstellung indirekter Auftrag nach [Kipphan 2000, Techner 1991]

Aufgrund der ausschließlich vollflächigen Aufträge wird ferner vorgeschlagen, als Druckverfahren den Hochdruck einzusetzen. Je nach Druckwerksauslegung würde es sich bei der direkten Variante um ein Flexodruckverfahren (mit weich- bis hartelastischer Druckform) und bei der indirekten Variante um den Lettersetdruck (mit einer harten Auswaschdruckplatte) handeln [Kipphan 2000, Teschner 1991].

Die im Folgenden vorgestellten Farbwerkskonfigurationen sind an dieser Stelle als Vorschläge für mögliche Beschichtungskonzepte zu betrachten. Eine abschließende Bewertung oder Auswahl ist ausblickend durchzuführen.

7.3.2 Farbwerk

Filmfarbwerk

Bei den hier vorgeschlagenen Farbwerktypen (Abbildung 7-6 und Abbildung 7-7) wird zur Dosierung der Farbe eine gravierte Filmwalze verwendet. Diese ist in einem definierten Abstand zum Farbduktor angeordnet und fräzt die durch Duktordrehzahl oder Farbzonenschieber eingestellte Farbmenge von diesem ab. Ein Vorteil von Filmfarbwerken gegenüber mit Farbhebern ausgestatteten Farbwerken ist die kontinuierliche Farbzuführung. Nachteilig ist, dass bei geringen Flächendeckungen im Sujet ein zu hoher Farbauftrag erfolgt. Da in dem vorliegenden Fall ausschließlich Vollflächen vorliegen, ist der genannte Nachteil obsolet. Bei der konzeptionellen Auslegung des Walzenstuhls beider Varianten sind möglichst wenige bzw. nur notwendige Walzenkörper berücksichtigt, um dennoch einen homogenen Farbauftrag erzielen zu können. Ausblickend ist zu prüfen, ob oder wie stark ein eventuelles Schablonieren auftritt. In diesem Fall sind entsprechende geometrische oder konzeptionelle Maßnahmen zu ergreifen [Fischer 2004, Gerner 2006, Schneider 2007, Singler 2008].

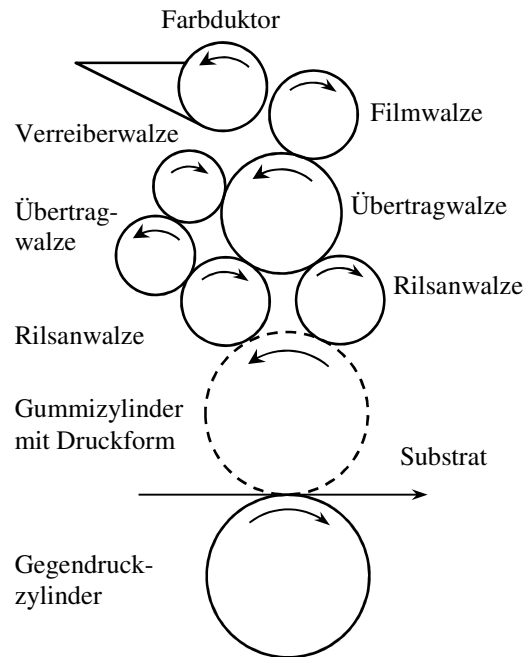


Abbildung 7-6: Direktes Filmfarbwerk [eigene Darstellung]

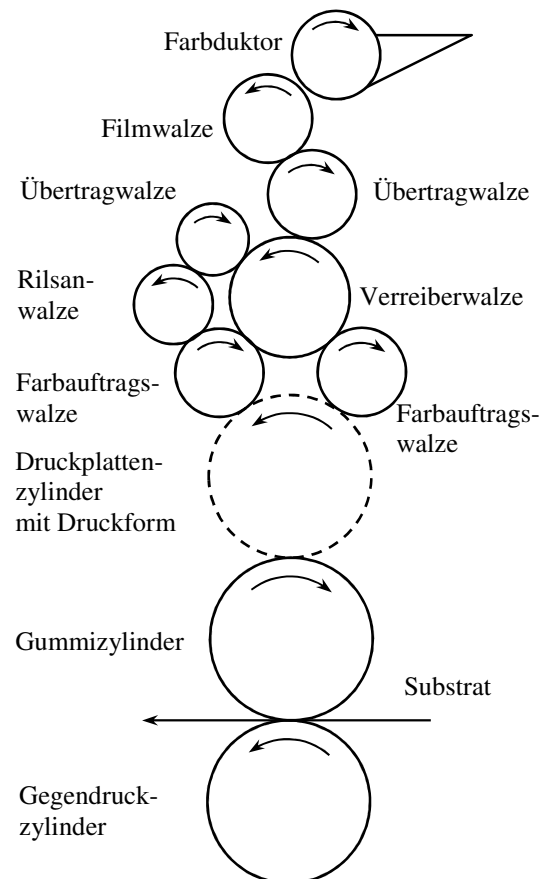


Abbildung 7-7: Indirektes Filmfarbwerk [eigene Darstellung]

Kurzfarbwerk

Ein weiterer Vorschlag zum Auftrag der UV-Grundierfarbe umfasst die Verwendung eines farbzonenfreien Aniloxfarbwerkes, auch als Kurzfarbwerk bezeichnet. Ein Vorschlag für ein direktes Aniloxfarbwerk ist in Abbildung 7-8 dargestellt. Die indirekte Variante ist in Abbildung 7-9 dargestellt. Für das Farbreservoir wird ein Schwerkraft-rakelsystem vorgeschlagen, welches einen Arbeitsbereich von bis zu ~8 m/s Oberflächengeschwindigkeit der gravierten Aniloxwalze besitzt [Masuch 2014]. Art und Spezifikation der Gravur der Aniloxwalze sind ausblickend zu verifizieren. Die beteiligten Zylinder und Walzen sind in der geometrischen Ausführung jeweils 1:1 umfangsgleich ausgeprägt. Damit wird ein vollständig schablonierfreier Farbauftrag gewährleistet. Vorteil der Kurzfarbwerk-technologie ist der hochdynamische Farbtransport und, damit verbunden, die zügige Einstellung eines stabilen Farbauftrags [Richter 2007, Röthlein 2014, Herrmann 2006].

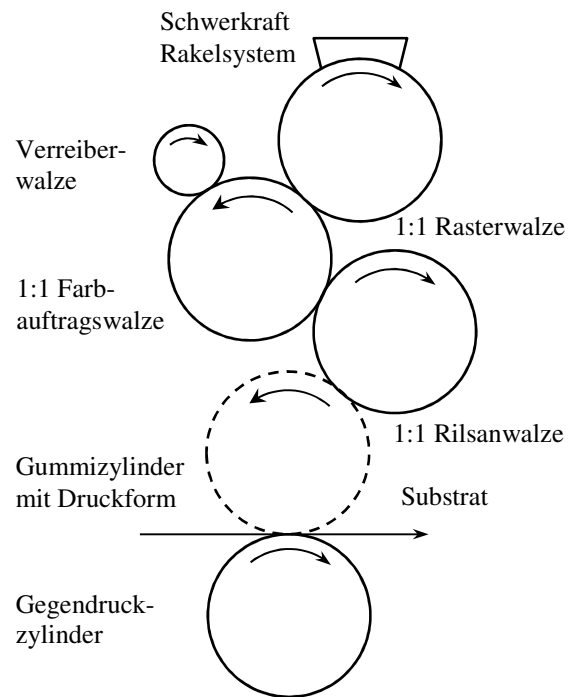


Abbildung 7-8: Direktes Aniloxfarbwerk [eigene Darstellung]

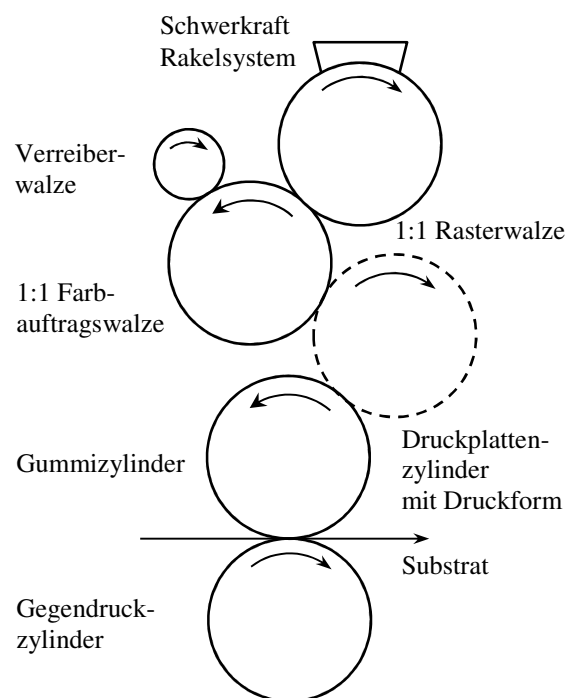


Abbildung 7-9: Indirektes Aniloxfarbwerk [eigene Darstellung]

Als das bevorzugte Druckverfahren zum Auftrag einer UV-Grundierfarbe wird der Hochdruck vorgeschlagen, unabhängig davon, ob es sich dabei um einen direkten oder indirekten Auftrag handelt. Da die Art des Sujets für den vorliegenden Fall vollflächig ausgeprägt ist und der Druck von gerasterten Motiven vernachlässigt werden kann, wird auch keine zonale Farbdosierung benötigt. Vielmehr liegt die Anforderung darin, einen möglichst homogenen Farbauftrag zu erzielen, der nach wenigen Umrollungen erreicht wird. Zudem ist das Weißblech im Blechdruck im Vergleich zu Papier und Karton im Bogenoffsetdruck sehr kostenintensiv. Als geeignete Farbwerktypen sind Film- oder Aniloxfarbwerke zu sehen.

Zur Gewährleistung einer sicheren Härtung des aufgetragenen Farbfilms liegt der für diese Anwendung bevorzugte ideale Farbauftrag bei 4 – 5 μm . Ferner gilt zu berücksichtigen, dass zur Erreichung eines zum Stand der Technik äquivalenten Weißgrades ein doppelter Auftrag mit zwei Farbwerken vorteilhaft wäre.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Anforderungen, nach denen die Farbwerkkonfiguration zu definieren ist:

- Absolut homogener Auftrag
- 4 – 5 μm Schichtauftrag der weißen Grundierfarbe
- Ggf. doppelter Auftrag zur Erreichung eines ausreichenden Weißgrades
- Ausschließlich Vollflächen
- Aussparungen in Form von 3 – 8 mm starken Längs- und Querlinien

Die vorgestellten Farbwerkkonfigurationen sind in entsprechenden funktionellen Versuchen zu evaluieren und an dieser Stelle als Empfehlungen zu behandeln. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich abschließend mit den möglichen Einsatzgebieten der hier vorgestellten Linienkonzeption.

7.4 Einsatzmöglichkeiten

Abschließend wird an dieser Stelle auf die Frage eingegangen, für welche Einsatzbereiche respektive für welche Metallverpackungen die hier vorgestellte Linienkonfiguration geeignet sein könnte. Dazu sind die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf wesentliche Einschränkungen ggü. dem Stand der Technik zu benennen:

- Verminderter Weißgrad, da mit einem Schichtauftrag lediglich 4 – 5 µm Farbschicht aufgetragen werden können (vgl. Abschnitt 6.1.2).
- Eingeschränkte Tiefziehfähigkeit in Verbindung mit Sterilisationsprozessen (vgl. Abschnitt 6.2.1).

Mit Kenntnis der genannten Einschränkungen, der Klassifikation von Metallverpackungen (vgl. Abschnitt 2.1.1, Abbildung 2-3) sowie unter Berücksichtigung der produktspezifischen Weiterverarbeitungsprozesse (vgl. Abschnitt 6.2.2, Tabelle 6-2) ergibt sich folgende Matrix:

Tabelle 7-1: Matrix der potenziellen, produktspezifischen Einsatzgebiete der vorgestellten Linienfiguration

Produkt	Segment	Nahrungsmittel/ Food	Starkes Tiefziehen	Potenzieller Einsatz
Kronkorken	3-Teil	-	-	Ja
Verschlüsse	3-Teil	Teilweise	Voll	Nein
Food-Dosen	3-Teil	Voll	Teilweise	Nein
Getränkedosen	3-Teil	-	Teilweise	Teilweise
Tuben/ Hülsen	Nicht 3-Teil	-	-	Nein
Flaschen	Nicht 3-Teil	-	-	Nein
CT-Dosen	3-Teil	-	-	Ja
Aerosol	3-Teil	-	-	Ja
Hobbocks	3-Teil	Teilweise	-	Teilweise
Kanister	3-Teil	-	Teilweise	Teilweise
Konservendose	3-Teil	Teilweise	-	Teilweise
Fässer	3-Teil	Teilweise	-	Teilweise

Aus Tabelle 7-1 ergibt sich, dass aufgrund der eingeschränkten Tiefziehfähigkeit in Verbindung mit Sterilisationsprozessen die Metallverpackungen Verschlüsse und Food-Dosen nicht für das vorgestellte Linienkonzept geeignet sind. Ferner ist der Einsatz für die Produkte Getränkedosen, Hobbocks, Kanister, Konservendose und Fässer denkbar, aber in praktischen Versuchen ausblickend zu prüfen. Alle übrigen Produkte im Segment 3-Teil sind für diese Linienkonfiguration geeignet.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Metallverpackungen aus Weißblech bilden den allgemeinen Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Aufgrund der enormen Produkt-Diversität dieser Gruppe von Verpackungen ist eine Klassifikation durchgeführt worden, auf dessen Basis der Blechdruck im Allgemeinen und der Aufbau, die Herstellungsprozesse und die Anforderungen dreiteiliger Metallverpackungen im Speziellen wissenschaftlich beschrieben werden konnte. Die Definition spezifischer Begriffe sowie die Beschreibung der im Blechdruck verwendeten Materialien, Trocknungs- und Härtingsverfahren wurden ebenso berücksichtigt, wie die für den Druck und die Lackierung zum Einsatz kommenden Produktionslinien und Linienkonfigurationen.

Die Überführung der thermisch trocknenden Beschichtung des Außenlacks auf Weißblech zu einem UV-härtenden Farbsystem bildete den wesentlichen Schwerpunkt dieser Arbeit und der konzeptionellen Zielsetzung. Im Zuge dessen wurden Untersuchungen mit radikalisch härtenden UV-Weißfarben und deren Haftungsvermögen auf verschiedenen Weißblechvarianten durchgeführt. Mittels Kontaktwinkelmessungen konnte die Benetzungsfähigkeit der eingesetzten Weißblechvarianten charakterisiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass chromfreie Weißbleche gegenüber verchromten und verzinnerten Weißblechen ein positives Benetzungsverhalten aufweisen und für Beschichtungen mit UV-härtenden Farben im besonderen Maß geeignet sind. Die methodische Anwendung des Gitterschnitttests in Verbindung mit dem Tesa-Test bestätigte die Eignung, chromfreie Weißbleche mit UV-härtenden Farben beschichten zu können. Mittels Schlagfalttest, Ritzhärte-Prüfung, Beta-Napf-Prüfung und Tiefungsversuch sowie zusätzlicher Sterilisation kamen Methoden zum Einsatz, mit denen die Umformbarkeit der Beschichtung von Weißblechen charakterisiert werden konnte. Für starke Tiefzieh-Beanspruchungen in Kombination mit einer Sterilisierung verfügt die UV-Farbe allerdings über zu wenig Flexibilität, um auf dem Weißblech ausreichend zu haften. Daraus resultiert, dass die UV-Farben für eine Anwendung auf Nahrungsmittelverpackungen noch ungeeignet sind. Dennoch konnte der wissenschaftlichen Zielsetzung Rechnung getragen und erstmals gezeigt werden, dass bei einer geeigneten Farbe-/ Weißblechkombination aus radikalisch härtender UV-Farbe und einem chromfreien Weißblech eine Beschichtung, als Ersatz für einen thermisch trocknenden Außenlack, möglich ist.

Um die Haftung UV-härtender Farben auf Weißblech zusätzlich positiv zu beeinflussen, war eine wissenschaftliche Zielsetzung die Untersuchung von Vorbehandlungsverfahren, im speziellen der Vorbehandlung mittels UV-Strahlen, bis hin zum Verständnisgewinn der photochemischen Wirkmechanismen von UV-Strahlen auf Weißblech. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz eines Excimer-Strahlers unter den getesteten UV-basierten Verfahren den größten Wirkungsgrad besitzt. Der Arbeitsbereich des Excimer-Strahlers liegt bei 172 nm, womit ausreichend Energie erzeugt wird, um die auf der Weißblechoberfläche vorliegenden molekularen Kontaminationen (bis zu C=O) zu entfernen. Damit wurde eine wissenschaftliche Zielsetzung erreicht und ein Verständnisgewinn der photochemischen Wirkmechanismen von UV-Strahlen auf Weißblech erlangt. Die Untersuchung erstreckte sich ferner auf eine erstmalige Charakterisierung der Oberflächenmodifikation im Kurzzeitbereich (< 1 Min.) sowie einen Substratvergleich ähnlicher Versuchsaufbauten der Literatur von Kunststoffen. Im Ergebnis zeigte sich, dass die wesentliche Modifikation der Oberflächeneigenschaften bereits innerhalb der ersten 30 Sekunden der UV-Strahleneinwirkung verrichtet wird. Allerdings ist diese Einwirkungsdauer zum Zwecke einer Vorbehandlung innerhalb einer Blechdruckmaschine zu lang und damit ungeeignet. Für andere Oberflächenanwendungen, bei denen mehr Zeit für die Vorbehandlung zur Verfügung steht, könnte der Einsatz dieses Verfahrens aber durchaus Potenzial bieten. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine Vorbehandlung mittels Atmosphärendruck-Plasma von den untersuchten Verfahren den mit Abstand höchsten Wirkungsgrad zur Modifikation von Oberflächeneigenschaften besitzt.

Ein Ziel dieser Arbeit war es zudem, eine Systematik zu erarbeiten, welche die Prüfmethode mit den zur Anwendung kommenden Weiterverarbeitungsprozessen spezifischer Produkte in Verbindung zu bringen vermag. Anhand mehrerer Beispiele wurde eine Methode vorgestellt, mit der die produktspezifischen Weiterverarbeitungsprozesse mit Prüfmethode zur Umformbarkeit in Korrelation gebracht werden konnte. Daraus ableitend werden erstmals die produktspezifischen Mindestprüfanforderungen für Metallverpackungen definiert und diesem wissenschaftlichen Ziel genüge getan.

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse ist es gelungen, eine Linienkonfiguration zu entwickeln, auf Basis dessen zwei Varianten für neue Produktionslinien detailliert beschrieben und abgeleitet werden konnten. Die entwickelte Linienkonfiguration erlaubt es, die Liniendurchläufe der Weißblechtafeln auf nur noch zwei zu reduzieren. Damit ist auch das Kernziel dieser Arbeit erfüllt, eine konzeptionelle Prozessstraffung aufzuzeigen, um damit Metallverpackungen nach Möglichkeit wirtschaftlicher herstellen zu können. Darüber hinaus erstrecken sich die konzeptionellen Folgerungen auch auf den Einsatz verschiedener Farbwerktechnologien, mit denen die UV-härtende Farbe auf das Weißblech aufgetragen werden könnte.

Ausblickend sollten weitere Entwicklungsmaßnahmen an der UV-Farbe durchgeführt werden, mit dem Ziel, die Sterilisier- und Tiefziehfähigkeit zu verbessern. Damit würde sich das Einsatzgebiet des Maschinenkonzepts stark erweitern (auf Nahrungsmittelverpackungen) und es könnte eine breite Akzeptanz bei Anwendern hervorgerufen werden, um in die hier vorgestellten Produktionslinien zu investieren. Des Weiteren empfiehlt es sich, die hier im Labormaßstab durchgeführten Versuche in die Praxis zu übertragen, indem mit den entsprechenden Materialien, UV-Farbe und chromfreiem Weißblech Testreihen auf Produktionsanlagen durchgeführt werden. Darüber hinaus sollten innerhalb dieser Testreihen auch tatsächliche Musterprodukte hergestellt werden, um so die Machbarkeit im Rahmen eines Feldtests verifizieren zu können.

Die aktuellen Entwicklungen der REACH-Verordnung sollten weiterhin beobachtet werden. Ebenso sollte der Weiterverfolgung der Entwicklung zu chromfreien Weißblech ein hohes Maß an Bedeutung zuteil kommen.

Die Untersuchungen der verschiedenen Vorbehandlungsverfahren haben gezeigt, dass das Plasmaverfahren den mit Abstand höchsten Wirkungsgrad besitzt. Dementsprechend ist es empfehlenswert, weiterführende Untersuchungen mit dem Plasmaverfahren in Kombination mit verzinnem und verchromtem Weißblech durchzuführen. Damit könnten auch diese Weißblechvarianten, welche über unzureichende Oberflächeneigenschaften verfügen, für das hier vorgestellte Linienkonzept und den Einsatz UV-härtender Farben interessant werden.

9. Literaturverzeichnis

- [Arcelor 2017] Arcelor Mittal (2017): *Steel for packaging – Product catalogue*
- [Ashton 2015] Ashton, K. (2015): *How to Fly a Horse: The Secret History of Creation, Invention and Discovery*, Random House LLC, New York
- [Aymerich 2010] Aymerich, E. F. (2004): *Photochemical nanomodification of polymer surfaces: Aerospace applications*, Masterthesis, Universität Politècnica de Catalunya
- [Barilli 2003] Barilli, F. et al. (2003): *Study on the adhesion of different types of lacquers used in food packaging*, Progress in Organic Coatings 46, S. 91-96
- [Berdzinski 2014] Berdzinski, S. (2014): *Photoinduzierte radikalische Polymerisation in ionischen Flüssigkeiten und der Einfluss der Radikalrekombination*, Dissertation, Universität Potsdam
- [Berg 1998] Berg, M. (1998): *Untersuchungen zur Erzeugung und Dosierung dünner Flüssigkeitsschichten auf Walzen*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz
- [BG ETEM o. J.] BG ETEM (o. J.): *UV-Trocknung*, Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Wiesbaden
- [BG Druck 2007] BG Druck und Papierverarbeitung (2007): *UV-Technologie Der Praxisleitfaden für alle Druckverfahren*, Berufsgenossenschaft Druck und Papierverarbeitung, Wiesbaden
- [Bischof 1989] Bischof, C., Bauer, A., Possart, W., Kapelle, R., Schulze, R. D. (1989): *Zur Adhäsion in Metall-Polymer-Grenzschichten und ihrer praktischen Nutzung*, Acta Polymerica 40:3, S. 214–221
- [Bischof 1993] Bischof, C. (1993): *ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Metall-Polymer-Verbunden*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 24, S. 33–41
- [Boelen 2004] Boelen, B., den Hartog, H., van der Weijde, H. (2004): *Product performance of polymer coated packaging steel, study of the mechanism of defect growth in cans*, Progress in Organic Coatings 50 (2004), S. 40–46
- [Bogumil 2005] Bogumil, K. (2005): *Absorptionsspektroskopie von Ozon und anderen wichtigen atmosphärischen Spurgasen mit dem SCIAMACHY-Satellitenspektrometer im ultravioletten bis nahinfraroten Spektralbereich*, Dissertation, Universität Bremen

- [Brinckmann 2011] Brinckmann, F. (2011): *Lacktrocknungsvorgänge auf dreidimensionalen Geometrien – Simulation und Experiment –*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- [Brock 2012] Brock, T., Groteklaes, M., Mischke, P., Strehmel, B. (2012): *Lehrbuch der Lacktechnologie*, 4. Auflage, Vincentz Network, Hannover
- [Brody 1997] Brody, A., Marsh, K. (1997): *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, 2. Auflage, John Wiley & Sons
- [CanCentral 2018] www.cancentral.com (2018): *History of the Can*, [online] <http://www.cancentral.com/can-stats/history-of-the-can> [04.08.2018]
- [Coles 2003] Coles, R. (2003): *Food Packaging Technology*, Blackwell Publishing Ltd.
- [Cumpson 2012] Cumpson, P., Sano, N. (2012): *Stability of reference masses V: UV/ozone treatment of gold and platinum surfaces*, iop science, Metrologia 50 (2013), S. 27-36
- [Deggelbam 2018] www.deggelbam.de (2018): *Starterpaket Kronkorken*, [online] <http://deggelbam.de/Starterpaket-Kronkorken> [09.06.2018]
- [Demuth 2005] Demuth, U. (2005): *Die Geschichte der Konservendose*, [online] <https://geckoparc.jimdo.com/kontakt/die-geschichte-der-blechdose/> [04.08.2018]
- [deVooy 2012] de Vooy, A. C. A., Boelen, B., van der Weijde, D. H. (2012): *Screening of coated metal packaging cans using EIS*, Progress in Organic Coatings 73 (2012), S. 202-210
- [DIN 1519] DIN EN ISO 1519: 2011 (2011): *Beschichtungsstoffe – Dornbiegeversuch (zylindrischer Dorn)*
- [DIN 1520] DIN EN ISO 1520: 2006 (2007): *Beschichtungsstoffe – Tiefungsprüfung*
- [DIN 1669] DIN EN ISO 1669: 1996 (1996): *Zipfelprüfung an Blechen und Bändern*
- [DIN 2409] DIN EN ISO 2409: 2013 (2013): *Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2013)*, Deutsche Fassung EN ISO 2409:2013
- [DIN 5031] DIN 5031 (1984): *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Benennung der Wellenlängenbereiche*, DIN 5031 – Teil 7

- [DIN 6272] DIN EN ISO 6282-2: 2011 (2011): *Prüfung der Widerstandsfähigkeit bei schlagartiger Verformung*
- [DIN 15184] DIN EN ISO 15184: 2012 (2013): *Bestimmung der Härte von Beschichtungen durch Testen mit Bleistiften*
- [DIN 17132] DIN EN ISO 17132: 2007: 2012 (2008): *Beschichtungsstoffe – T-Biegeprüfung*
- [DIN 20482] DIN EN ISO 20482: 2013 (2014): *Tiefungsversuch nach Erichsen*
- [Discounto 2018] www.discounto.de (2018): *6 Gläser mit Schraubverschluss, klein*, [online] <https://www.discounto.de/Angebot/6-Glaeser-mit-Schraubverschluss-klein-1590136/> [09.06.2018]
- [Doege 2007] Doege, E., Behrens, B.-A. (2007): *Handbuch Umformtechnik Grundlagen, Technologien, Maschinen*, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [Dowbenko 1983] Dowbenko, R., Friedlander, C., Gruber, G., Prucnal, P., Wismer, M. (1983): *Radiation curing of organic coatings*, Progress in Organic Coatings 11, S. 71-103 (1983)
- [Duden 2018] www.duden.de (2018): *Konservendose*, die, [online] <https://www.duden.de/rechtschreibung/Konservendose> [09.06.2018]
- [Dutschk 2000] Dutschk, V. (2000): *Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten*, Dissertation, Technische Universität Dresden
- [Egitto 1994] Egitto, F. D., Matienzo, L. J. (1994): *Plasma modification of polymer surfaces for adhesion improvement*, IBM J. Res. & Dev. 38, S. 423–439 (1994)
- [Empac 2015] Empac G.I.E. (2015): *How three-piece welded food cans are made*, [online] http://www.empac.eu/uploads/downloads/howCansAreMade/Empac_howThreePieceWeldedFoodCanIsMade.pdf [24.09.2015]
- [Emtec 2017] Aroni, J. (2017): *u17233metallprint*, Untersuchungsbericht, EMTEC-Elektronenmikroskopie, Mannheim
- [Erichsen 1999] Erichsen (1999): *Schlagfalt-Prüfgerät Modell 471*, Bedienungsanleitung, Erichsen GmbH & Co. KG, Hemer

- [Fattahi 2012] Fattahi, F., Izadan, H., Khoddami, A. (2012): *Investigation into the Effect of UV/Ozone Irradiation on Dyeing Behaviour of Poly(Lactic Acid) and Poly(Ethylene Terephthalate) Substrates*, Progress Color Colorants Coatings 5 (2012), S. 15-22
- [Fischer 2004] Fischer, M. (2004): *Filmwalze für ein Filmfarbwerk einer Druckmaschine*, Deutsches Patentamt, DE102004003424A1, Anmeldedatum: 23.01.2004
- [Fouassier 2003] Fouassier, J. P., Allonas, X., Gurget, D. (2003): *Photopolymerization reactions under visible lights : principle, mechanisms and examples of applications*, Progress in Organic Coatings 47, S. 16 – 36
- [Fragni 2006] Fragni, R. et al. (2006): *Adhesion improvement of the UV lacquers for food cans by applying a post-curing current treatment*, Progress in Organic Coatings 55, S. 254-261
- [Geme 2016] Geme Mesker GmbH (2016): *ohne Titel* [online] <http://www.geme-mesker.de> [15.01.2016]
- [Gerner 2006] Gerner, E., Fischer, M., Schoeps, M. (2006): *Druckmaschine mit einem Filmfarbwerk mit einer Filmwalze*, Deutsches Patentamt, DE102006015490A1, Anmeldedatum: 03.04.2006
- [Gleich 2004] Gleich, H. (2004): *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen
- [Goldschmidt 2007] Goldschmidt, A., Streitberger, H.-J. (2007): *BASF Handbook on Basics of Coating Technology*, 2. Auflage, Vincentz Verlag (2007)
- [Gotoh 2004] Gotoh, K. (2004): *Wettability and surface free energies of polymeric materials exposed to excimer ultraviolet light and particle deposition onto their surfaces in water*, Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion, Vol. 3, pp. 125-137, K.L. Mittal (2004)
- [Griesheimer 2013] Griesheimer, S. (2013): *Farbspaltungsphänomene von Druckfarben an strukturierten Oberflächen am Beispiel des Flexodrucks*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt

- [Grotz 2018] Grotz, B. (2018): *Grundwissen Physik*, [online] <http://www.grundwissen.de> [07.04.2018]
- [Gutfleisch 2004] Gutfleisch, M. (2004): *Oberflächenanalytische Untersuchungen an nasschemisch, photochemisch und photothermisch modifizierten Titandiooxid-Oberflächen*, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [GVM 2015] GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (2015): *Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013*
- [GVM 2016] GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (2016): *Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2014*
- [Heering 2004] Heering, W. (2004): *UV SOURCES – Basics, Properties and Applications*, Fachartikel, IUVA News, Vol 6, No. 4, Universität Karlsruhe
- [Heincke 2002] Heincke, K.-D., Bernwald, Z. (2002): *Blechdruck Heute*, Fachhefte Grafische Industrie 6-2002
- [Hellwig 2013] Hellwig, W. (2013): *Spanlose Fertigung: Stanzen: Konventionelles Stanzen, Hochleistungsstanzen, Feinstanzen*, 7. Auflage, Springer-Verlag, Wiesbaden
- [Herold 2001] Herold, M. (2001): *Modifikation von Festkörperoberflächen und ihre Charakterisierung durch Ellipsometrie*, Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen
- [Herrmann 2006] Herrmann, U., Nerger, R., Schillheim, M. (2006): *Kurzfarbwerk für eine Druckmaschine*, Deutsches Patentamt, DE102006004568A1, Anmeldedatum: 01.02.2006
- [Hild 2006] Hild, S. (2006): *Herstellung und Charakterisierung von Korrosionsschutzschichten auf Basis von selbstorganisierenden Monoschichten*, Diplomarbeit, Hochschule Darmstadt
- [Hoenle o. J.] Hönle (o. J.): *Grundlagen: Funktionsprinzip UV-reaktiver Fertigungsprozesse*, Fachartikel, Dr. Hönle AG, [online] https://www.hoenle.de/hoenle.de/presse/fachartikel/grundlagen_d.pdf [21.08.2017]
- [Huber o. J.] Huber (o. J.): *INKFORMATION: UV-härtende Farben und Lacke für den Offsetdruck*, Informationsbroschüre, Hubergroup, Kirchheim, [online] https://www.hubergroup.de/fileadmin/Redaktion/Editorial_Content/Documents/INKFORMATION/INKFORMATION_5_de.pdf [29.05.2018]

- [Hüfner 2003] Hüfner, S. (2003): *Photoelectron Spectroscopy Principles and Applications*, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [Ibis 2015] Ibis, M. (2003): *Umformen von Aluminiumblechen mit aufgedruckter Elektronik am Beispiel von Dehnungsmessstreifen*, Dissertation, Shaker-Verlag, TU Darmstadt
- [Joos-Müller 2007] Joos-Müller, B., Öchsner, P., Eisenbach, C. D. (2007): *Haftpunkte, Farbe & Lack*, 34 (2007)
- [Joos-Müller 2010] Joos-Müller, B. (2010): *Nasshaftfestigkeit von UV-Drucken auf Polypropylen und Einfluss der Zeitspanne zwischen der Vorbehandlung und dem Bedrucken*, Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke e. V., Stuttgart
- [Jüstel 2014] Jüstel, T. (2014): *Photochemische Reaktionen*, Institut für optische Technologien, Münster, Fachvortrag auf dem 19. Symposium der DAfP, Nürnberg
- [Jüstel 2017] Jüstel, T. (2017): *UV-Desinfektion: Gegenwärtiger Stand und zukünftige Entwicklungen*, IWW Kolloquium, Mühlheim an der Ruhr
- [Kamps 2012] Kamps, S. (2012): *Untersuchungen und Herstellung von hydrophoben und superhydrophoben Beschichtungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs durch dauerhafte Tropfenkondensation*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- [Kaßmann 2014] Kaßmann, M. (2014): *Grundlagen der Verpackung – Leitfaden für fächerübergreifende Verpackungsausbildung*, 2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, S. 20
- [KBA 2002] McHugh, J. (2002) *Interner Versuchsbericht*, Koenig & Bauer MetalPrint-GmbH, Stuttgart
- [KBA 2003] Höhne, A. (2003): *Interner Versuchsbericht*, Koenig & Bauer MetalPrint GmbH, Stuttgart
- [KBA 2012] Koenig & Bauer MetalPrint GmbH (2012): *Printing, coating and drying of metal sheets made of tinplate, aluminium or steel*, Stuttgart
- [KBA 2016a] Koenig & Bauer MetalPrint GmbH (2016): *Interne Schulungsunterlagen*, Stuttgart

-
- [KBA 2016b] Koenig & Bauer MetalPrint GmbH (2016): *Interne Verkaufsdatenauswertung*, Stuttgart
- [KBA 2016c] Behnke, S. (2016): *Untersuchung der Haftung von UV-härtendem Weißlack auf verschiedenen Weißblechen*, interner Versuchsbericht, Nr. 1, Koenig & Bauer MetalPrint GmbH, Stuttgart
- [KBA 2016d] Behnke, S. (2016): *Untersuchung der Haftung von UV-härtendem Weißlack auf verschiedenen Weißblechen*, interner Versuchsbericht, Nr. 2, Koenig & Bauer MetalPrint GmbH, Stuttgart
- [KBA 2017a] Koenig & Bauer MetalPrint GmbH (2017): *LTG Wicket Oven*, Vertriebspräsentation, Stuttgart
- [KBA 2017b] Behnke, S. (2017): *Untersuchung der Haftung von UV-härtendem Weißlack auf verschiedenen Weißblechen*, interner Versuchsbericht, Nr. 3, Koenig & Bauer MetalPrint GmbH, Stuttgart
- [KBA 2017c] Behnke, S., Törkö, B. (2017): *Untersuchung der Haftung von UV-härtendem Weißlack auf verschiedenen Weißblechen*, interner Versuchsbericht, Nr. 4, Koenig & Bauer MetalPrint GmbH, Stuttgart
- [KBA 2017d] Koenig & Bauer MetalPrint GmbH (2017): *Interne Marktanalyse*, Stuttgart
- [KBA 2017e] Törkö, B. (2017): *Interne technische Dokumentation*, Koenig & Bauer MetalPrint GmbH, Stuttgart
- [KBA 2019] Koenig & Bauer MetalPrint GmbH (2019): *Mailänder 280 – Exceptional technologies for efficient production*, Produktbroschüre, Stuttgart
- [Kinloch 1987] Kinloch, A. J. (1987): *Adhesion and Adhesives Science and Technology*, 1. Auflage, Chapman & Hall, London
- [Kipphan 2000] Kipphan, H. (2000): *Handbuch der Printmedien Technologien und Produktionsverfahren*, Springer Verlag, Berlin; Heidelberg
- [Kittel 2008] Kittel, H. (2008): *Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen*, Band 6, S. Hirzel Verlag, Stuttgart

- [Klothe 2013] Klothé, C. (2013): *Oberflächenvorbehandlung von Fügeteilen zur Optimierung adhäsiver Verbindungen im konstruktiven Glasbau*, Dissertation, Technische Universität Dresden
- [Kohli 2015] Kohli, R., Mittal, K. L. (2015): *Developments in Surface Contamination and Cleaning – Cleaning Techniques*, Volume 8
- [Koller 1952] Koller, L. R. (1952): *Ultraviolet radiation*, Wiley
- [Krüss 2017] Krüss (2017): *ohne Titel* [online] www.kruess.de [22.10.2017]
- [KrW AbfG 1994] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705)
- [Kuang 2015] Kuang, P., Constant, K. (2015): *Increased Wettability and Surface Free Energy of Polyurethane by Ultraviolet Ozone Treatment*, Wetting and Wettability, S. 85-103 (2015)
- [Ludin 2012] Ludin, G. M., Wagner, M. (2012): *Druckvorrichtung und Verfahren zum Bedrucken von Flächengebilden*, Europäisches Patentamt, EP2428359A1, Anmeldedatum: 22.11.2010
- [Lukasson 2007] Lukasson-Herzig, A.M. (2007): *Optimierung der Stahlbandgeometrie im Hinblick auf den Bandsäbel in Warmbreitbandstrassen*, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [Maeda 1983] Maeda, S. (1983): *Steel surface chemistry affecting the performance of organic coatings*, Progress in Organic Coatings 11, S. 1–18 (1983)
- [Martorana 2010] Martorana, E. (2010): *Untersuchungen zur Papierleimung mit Alkenylbernsteinsäureanhydrid (ASA)*, Dissertation, Technische Universität Dresden
- [Massa 2016] Massa, J. (2016): persönliche Mitteilung, HUBER Packaging Group GmbH
- [Masuch 2014] Masuch, B. (2015): persönliche Mitteilung, Koenig und Bauer AG
- [McHugh 2005] McHugh, J. (2005): *Einrichtung zum Bedrucken von als Metalltafeln ausgebildetem Druckmaterial sowie entsprechendes Verfahren*, Europäisches Patentamt, EP1503899B1, Anmeldedatum: 19.04.2002

- [Mehnert 2017] Mehnert, R., Schubert, R. (2017): *VUV-Strahlung aus dem Plasma*, Farbe & Lack, 103 (1997)
- [Mehnert 2018] Mehnert, R., Schubert, R. (2018): *Oberflächenreinigung und -aktivierung mittels Excimer- und UV-Niederdrucklampen und Energie*, Farbe & Lack, 103 (1997)
- [Meichsner 1997] Meichsner, G., Beck, E., Menzel, K., Deuter, F., Groß, T. (1997): *ohne Titel*, Farbe & Lack, 103 (1997)
- [Mischke 2007] Mischke, P. (2007): *Filmbildung in modernen Lacksystemen*, Vincentz Network, Hannover
- [Mittal 1987] Mittal, K. L. (1987): *Treatise on Clean Surface Technology*, Volume 1, IBM Corporate Technical Institutes, Thornwood, New York
- [Mock 2004] Mock, U. (2004): *Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz
- [Mokler 2014] Mokler, B. (2014): *Metall – der etwas andere Bedruckstoff*, VDD Seminarreihe im IDD, TU Darmstadt
- [Monden 2016] Monden, A. (2016): *Adhäsion zwischen Epoxidharzenbasiertem CFK und oberflächenmodifiziertem Stahl: Grenzschichtversagen von Hybridlaminaten unter Mode I, Mode II und Mixed-Mode Belastung*, Dissertation, Universität Augsburg
- [Morgan 1985] Morgan, E. (1985): *Tinplate and modern Canmaking Technology*, Pergamon Press
- [Müller & Bauer 2017] Hegenloch, J., Hönes, R. (2017): Interview mit Jennifer Hegenloch und Richard Hönes der Fa. Müller & Bauer GmbH & Co. KG
- [Negele 1996] Negele, O., Funke, W. (1996): *Internal stress and wet adhesion of organic coatings*, Progress in Organic Coatings 28, S. 285–289 (1996)
- [Nestlé 2014] Nestlé Ltd. (2014): *Nestlé Guidance Note on Packaging Inks – version 02-2014*, Informationsblatt
- [Nettesheim 2016] Nettesheim S. (2016): *Bewertung der Aktivierungsleistung bei atmosphärischen Plasmasystemen*, Relyon Plasma GmbH, Regensburg

- [Nikolova 2005] Nikolova, D. (2005): *Charakterisierung und Modifizierung der Grenzflächen im Polymer-Metall-Verbund*, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- [O dian 2004] Odian, G. (2004): *Principles of Polymerization*, 4th Edition, John Wiley & Sons
- [Oldring 2007] Oldring, P., Nehring, U. (2007): *Packaging Materials 7. Metal Packaging for Foodstuff*, Report, International Life Science Institute
- [Özcam 2014] Özcam, A. E., Efimenko, K., Genzer, J. (2014): *Effect of ultraviolet/ozone treatment on the surface and bulk properties of poly(dimethyl siloxane) and poly(vinylmethyl siloxane) networks*, Polymer 55 (2014), S. 3107–3119
- [Paravia 2010] Paravia, M. (2010): *Effizienter Betrieb von Xenon-Excimer-Entladungen bei hoher Leistungsdichte*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- [Picard 2015] Picard, L., Phalip, P., Fleury, E., Ganachaud, F. (2015): *Chemical adhesion of silicone elastomers on primed metal surfaces: A comprehensive survey of open and patent literatures*, Progress in Organic Coatings 80 (2015), S. 120–141
- [Pieke 2009] Pieke, S. (2009): *Experimentelle Untersuchungen zur effizienten Vernetzung von Oberflächenbeschichtungen mit UV-Strahlung*, Dissertation, Universität Karlsruhe
- [Pietschmann 2005] Pietschmann, N., Schroeter, J., Kraatz, U., Heering, W. (2005): *Mit UV-Härtung zu besseren Metalllacken*, Fachartikel, Farbe & Lack 04/2005, S. 140, Vincentz Network, Hannover
- [Poulis 1993] Poulis, J. A., Cool, J. C., Logtenberg, E. H. P. (1993): *UV/ozone cleaning, a convenient alternative for high quality bonding preparation*, International Journal Adhesion and Adhesives, Vol 13, No. 2, S. 89-96
- [Rasche 1988] Rasche, M. (1988): *Oberflächenbehandlung von Kunststoffen*, Ingenieurbüro für Klebetechnik, Niederdruckplasmatechnologie und Oberflächentechnik, Berlin, 1988

- [Reach 2017] Umweltbundesamt (2017): *ohne Titel*, [online] <http://www.reach-info.de/einfuehrung.htm> [16.08.2017]
- [Regitz 1989] Regitz, M., Giese, B. (1989): *Methoden der organischen Chemie (Houben-Weyl) Band E19a C-Radikale*, 4. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York
- [Reinhardt 2008] Reinhardt, K., Kern, W. (2008): *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*, 2. Auflage, William Andrew Inc., Norwich, New York, USA
- [Richter 2007] Richter, F.-P., Schölzig, J. (2007): *Kurzfarbwerk für eine Verarbeitungsmaschine*, Europäisches Patentamt, EP1911586A2, Anmeldedatum: 19.09.2007
- [Riedel 2007] Riedel, E., Janiak, C. (2007): *Anorganische Chemie*, 7. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, New York
- [Robertson 2013] Robertson, G. L. (2013): *Food Packaging – Principles and Practice*, 3. Auflage, Taylor & Francis Group, Boca Raton
- [Röhrig 2010] Röhrig, R., Mis, K., Wiesebrock, S. (2010): *Branchenreport Verpackungsindustrie der IG Metall*, Frankfurt a. Main, S. 23
- [Röthlein 2014] Röthlein, E., Behnke, S., Reder, W., Schäfer, K., Zink, W. (2014): *Farbwerk eines Druckwerks*, Deutsches Patentamt, DE102014213807A1, Anmeldedatum: 16.07.2014
- [Roose 2009] Roose, P., Fallais, I., Vandermiers, C., Olivier, M.-G., Poelman, M. (2009): *Radiation curing technology. An attractive technology for metal coating*, Progress in Organic Coatings 64, S. 163–170 (2009)
- [Roth-Fölsch 2011] Roth-Fölsch, A. (2011): *Eine Frage des Kontaktwinkels*, Kunststoffe, Dok.-Nr.: KU110911
- [Ryntz 1994] Ryntz, R. A. (1994): *Coating adhesion to low surface free energy substrates*, Progress in Organic Coatings 25, S. 73–83 (1994)
- [Salignue 2009] Salignue, N. (2009): *Chemie, Spektroskopie und Massenspektroskopie von silylierten, halogenierten und methylierten Siliziumoberflächen*, Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität (2009)

- [Sato 1980] Sato, K. (1980): *The internal stress of coating films*, Progress in Organic Coatings 8, S. 143–160 (1980)
- [Schneider 2007] Schneider, G., Masuch, B. (2007): *Farbwerk einer Rotationsdruckmaschine mit einer Filmwalze*, Europäisches Patentamt, EP2019752B1, Anmeldedatum: 17.04.2007
- [Schultz 1977] Schultz, J., Tsutsumi, K., Donnet, J. B. (1977): *Surface properties of high-energy solids: I. Determination of the dispersive component of the surface free energy of mica and its energy of adhesion to water and n-alkanes*, Journal of Colloid and Interface Science, Volume 59, Issue 2, S. 272-276 (1977)
- [Sebold 1994] Sebold, M. (1994): *UV-Oxidation in der Gasphase*, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1. Auflage, Karlsruhe
- [Singler 2008] Singler, J. (2008): *Filmwalze für ein Farbwerk*, Deutsches Patentamt, DE102008022633A1, Anmeldedatum: 08.05.2008
- [Somborn 2008] Somborn, R. (2008): *Kettenlängen gezielt steuern*, Fachartikel, Farbe & Lack 07/2008, Vincentz Network, Hannover
- [Soudronic 2016] Soudronic AG (2016): *ohne Titel*, [online] <http://www.soudronic.com> [15.01.2016]
- [Steglich 2008] Steglich, K.-H. (2008): *Reinigung und Strukturierung empfindlicher Oberflächen mittels Excimerlaserstrahlung*, Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg
- [Strohmeier 1989] Strohmeier, B. R. (1989): *The effects of O₂ plasma treatments on the surface composition and wettability of cold-rolled aluminum foil*, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films 7, S. 3238–3245 (1989)
- [Sun 2017] Malo, G. (2017): persönliche Mitteilung, SunChemical
- [Tafelmeier o. J.] Tafelmaier E. (o. J.): *UV-Strahlenhärtungstechnologien*, Artikel, Coates Sreen GmbH, [online] <https://www.coates.de/snd/uvstrahlung.pdf> [18.07.2017]
- [Techner 1991] Techner, H. (1991): *Offsetdrucktechnik*, 8. Auflage, Fachschriftenverlag, Fellbach

- [ThreeBond 1987] ThreeBond (1987): *Ultraviolet-Ozone Surface Treatment*, Three Bond Technical News, 17, Tokio
- [TK Rasselstein 2015a] Thyssen Krupp Rasselstein GmbH (2015): *Wege der Produktion*, Andernach
- [TK Rasselstein 2015b] Thyssen Krupp Rasselstein GmbH (2015): *The basics of interactions „lacquer/tinplate“*, Andernach
- [TK Rasselstein 2015c] Thyssen Krupp Rasselstein GmbH (2015): *Lieferprogramm*, Andernach
- [Tracton 2006] Tracton, A. A. (2006): *Coating Technology Handbook*, 3rd Edition, Taylor and Francis Group, New York
- [Trampert 2008] Trampert, K. (2008): *Ladungstransportmodell dielektrisch behinderter Entladungen*, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
- [Turner 1998] Turner, T.A. (1998): *Canmaking: The Technology of Metal Protection and Decoration*, London, U.K. Blackie Academic & professional
- [Umweltbundesamt 2005] Umweltbundesamt (2005): *Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken für die Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen*
- [Unico 2009] UNICO Deutschland GmbH (2009): *Schubkurbelschere*, [online] <http://www.unicoeu.com/ger/index.php/de/anwendungen/48> [15.01.2016]
- [Vig 1977] Vig, J. R., LeBus, J. W. (1977): *Method of Cleaning Surfaces by Irradiation with Ultraviolet Light*, Patent, No.: 4,028,135, Anmeldedatum: 04.22.1976
- [Vig 1992] Vig, J. R. (1992): *Ultraviolet-Ozone Cleaning of Semiconductor Surfaces*, Army Research Laboratory, Fort Monmouth, USA
- [Voronov 2009] Voronov, A. (2009): *Übersicht der UV-Lampen und Ihre Einsatzgebiete*, VDD Seminarreihe im IDD, Darmstadt, 15.10.2009
- [Wang 2017] Wang, H., Yu, B., Jiang, S., Jiang, L., Qian, L. (2017): *UV/ozone-assisted tribochemistry-induced nanofabrication on Si(100) surfaces*, RSC Advances, 7, S. 39.651-39.656 (2017)
- [Warner 1858] Warner, E. J. (1858): *Instrument for opening cans*, Patent, US19063 Connecticut, USA

- [Westerlind 1987] Westerlind, B., Larsson, A., Rigdahl, M. (1987): *Determination of the degree of adhesion in plasma-treated polyethylene/paper laminates*, International Journal of Adhesion and Adhesives 7, S. 141–146 (1987)
- [Yam 2009] Yam, K. L. (2009): *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, 3. Auflage, John Wiley & Sons
- [Young 1805] Young, T. (1805): *An Essay on the Cohesion of Fluids*, London 1805, Vol. 95, S. 65
- [Zimmermann 2010] Zimmermann, L. (2010): *Dreidimensional nanostrukturierte und superhydrophobe mikrofluidische Systeme zur Tröpfchengenerierung und -handhabung*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie

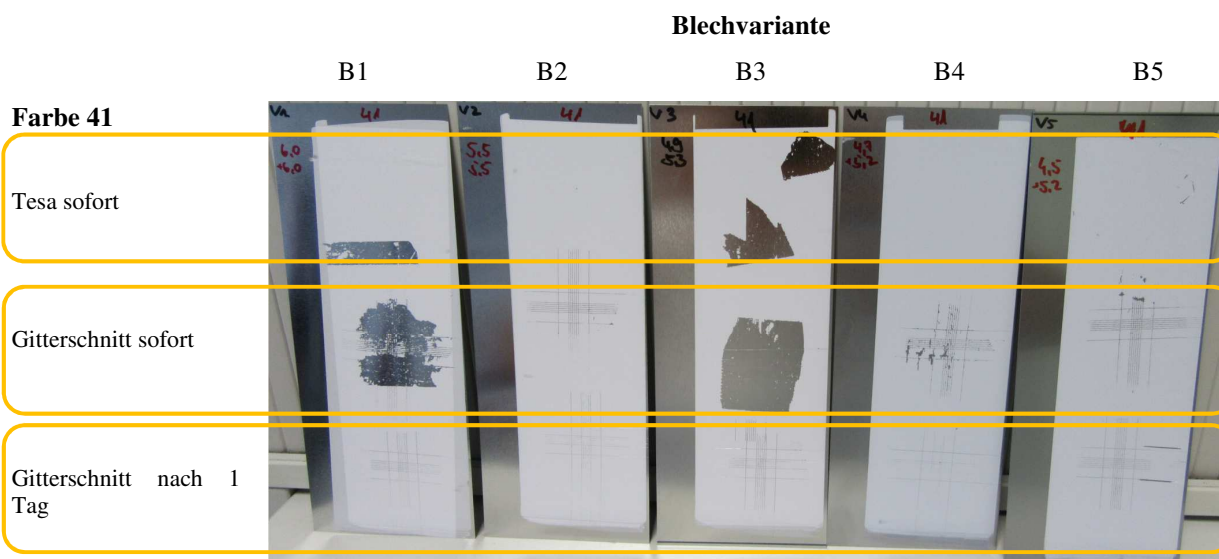
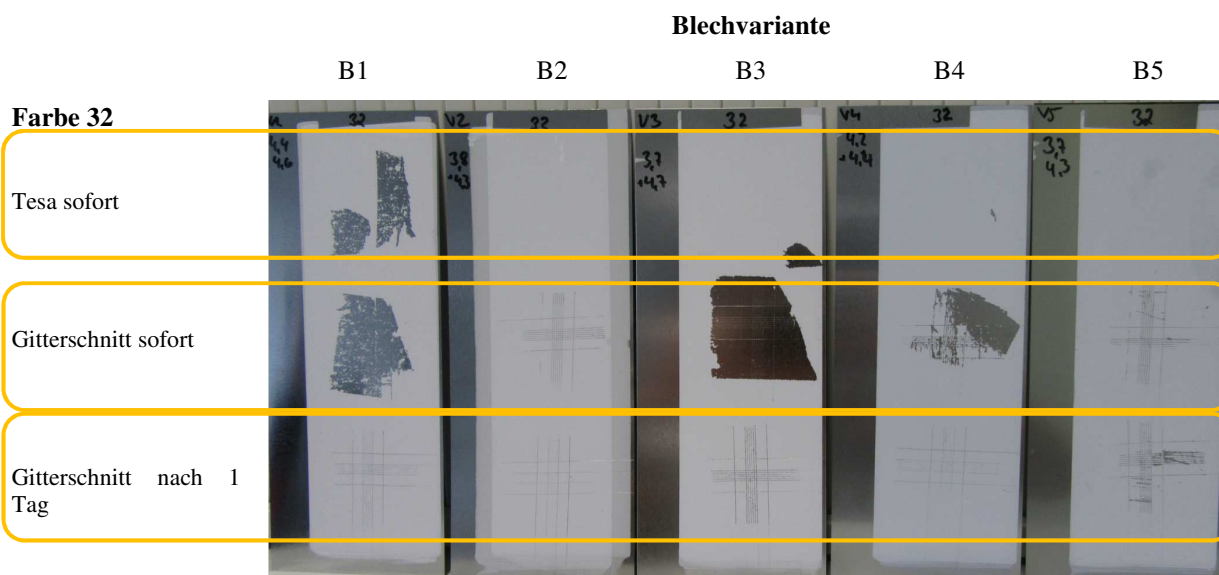
Patente und Patenmeldungen des Autors


- Behnke, S. (2019): *Verfahren zum Bedrucken eines metallischen Bedruckstoffes in einer Druckmaschine*, Koenig und Bauer AG, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102019101998.2, 2019
- Behnke, S., Gumbel, R., Törkö, B. (2019): *Verfahren und Druckmaschine jeweils zum Bedrucken eines metallischen Bedruckstoffes*, Koenig und Bauer AG, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102019101997.4, 2019
- Behnke, S., Weschenfelder, K. (2018): *Vorrichtung zum Bedrucken von Hohlkörpern*, Koenig und Bauer AG, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102018121542.8, 2018
- Behnke, S. (2018): *Produktionsanlage zum Bedrucken von Hohlkörpern*, Koenig und Bauer AG, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102018121537.1, 2018
- Behnke, S., Weschenfelder, K. (2018): *Vorrichtung zum Bedrucken von Hohlkörpern*, Koenig und Bauer AG, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102018201033.1, 2018


- Behnke, S. (2017): *Verfahren zum Bedrucken von Hohlkörpern*, KBA-MetalPrint GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102017202381.3, 2017
- Behnke, S. (2017): *Verfahren zum Bedrucken von Hohlkörpern*, KBA-MetalPrint GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102017202384.8, 2017
- Behnke, S. (2017): *Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung zum Bedrucken von Hohlkörpern*, KBA-MetalPrint GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102017202382.1, 2017
- Behnke, S., Schäfer, K. (2016): *Verfahren zum Betrieb einer ein Segmentrad aufweisenden Vorrichtung zum Bedrucken von Hohlkörpern*, KBA-MetalPrint GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE2016201140.5, 2016
- Behnke, S., Schäfer, K. (2016): *Vorrichtung zum Bedrucken von Hohlkörpern*, KBA-MetalPrint GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102016201139.1, 2016
- Behnke, S., Masuch, B., Weschenfelder, K. (2016): *Vorrichtung zum Bedrucken von Hohlkörpern*, KBA-MetalPrint GmbH, Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungsnummer DE102016201137.5, 2016

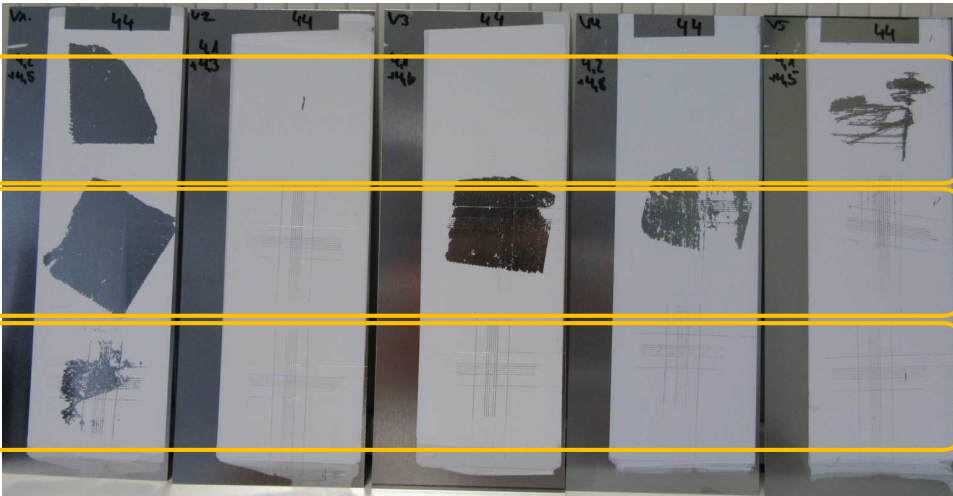
A. Anhang

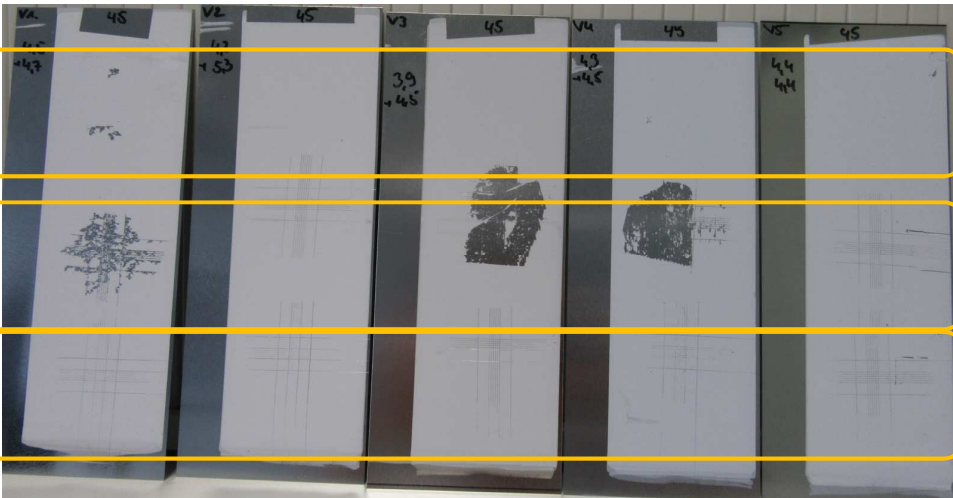
A.1 Probenbleche der Vorversuche: Farbentwicklung



		Blechvariante				
		B1	B2	B3	B4	B5
Farbe 42						
Tesa sofort						
Gitterschnitt sofort						
Gitterschnitt nach 1 Tag						

		Blechvariante				
		B1	B2	B3	B4	B5
Farbe 43						
Tesa sofort						
Gitterschnitt sofort						
Gitterschnitt nach 1 Tag						

		Blechvariante				
		B1	B2	B3	B4	B5
Farbe 44						
Tesa sofort						
Gitterschnitt sofort						
Gitterschnitt nach 1 Tag						

		Blechvariante				
		B1	B2	B3	B4	B5
Farbe 45						
Tesa sofort						
Gitterschnitt sofort						
Gitterschnitt nach 1 Tag						

A.2 Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen

Die folgenden Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen wurden von der Fa. EMTEC – Elektronenmikroskopie und Materialanalyse erstellt. Die Diskussion der Ergebnisse ist in Abschnitt 5.4.7 durchgeführt.

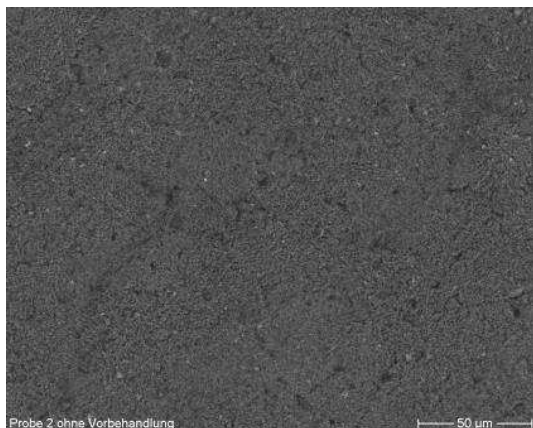
Probe D2: ohne Vorbehandlung ETP

Abbildung A-1: Probe D2; ETP; ohne Vorbehandlung 400-fach; BE

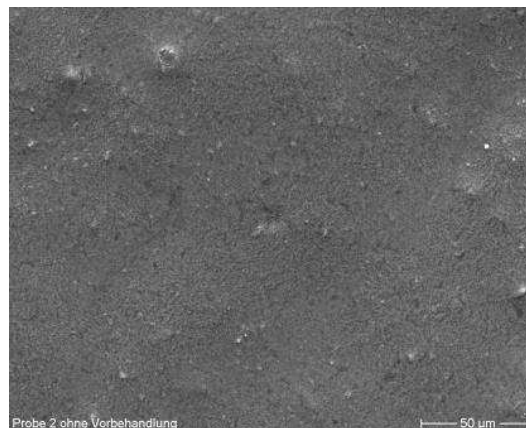


Abbildung A-2: Probe D2; ETP; ohne Vorbehandlung 400-fach; SE

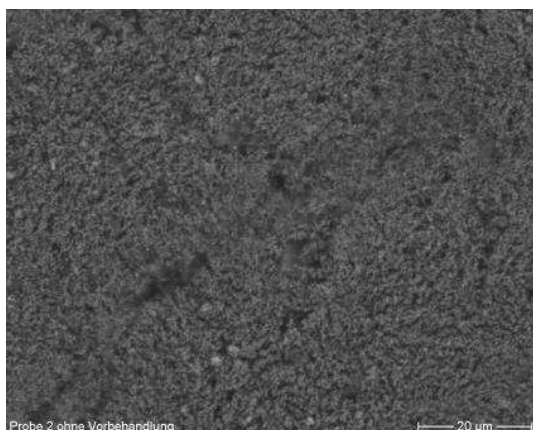


Abbildung A-3: Probe D2; ETP; ohne Vorbehandlung 1.000-fach; BE

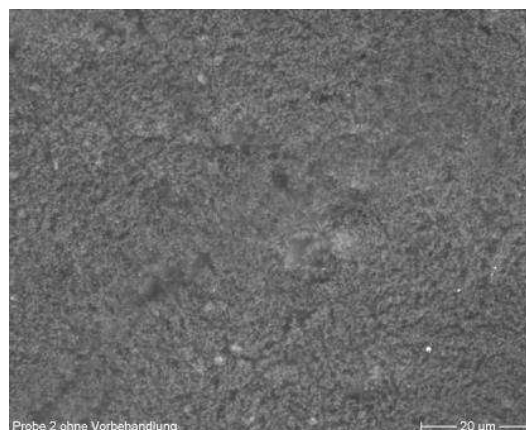


Abbildung A-4: Probe D2; ETP; ohne Vorbehandlung 1.000-fach; SE

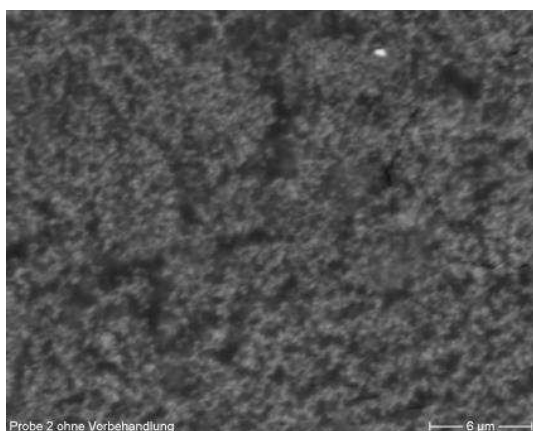


Abbildung A-5: Probe D2; ETP; ohne Vorbehandlung 3.000-fach; BE

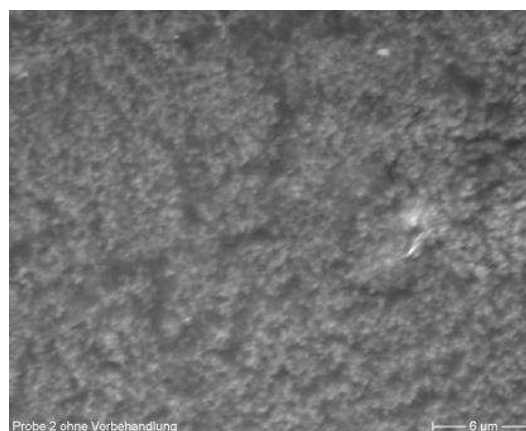


Abbildung A-6: Probe D2; ETP; ohne Vorbehandlung 3.000-fach; SE

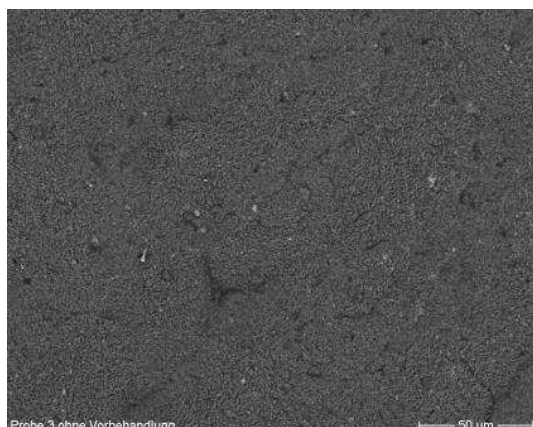
Probe D3: ohne Vorbehandlung ECCS

Abbildung A-7: Probe D3; ECCS; ohne Vorbehandlung 400-fach; BE

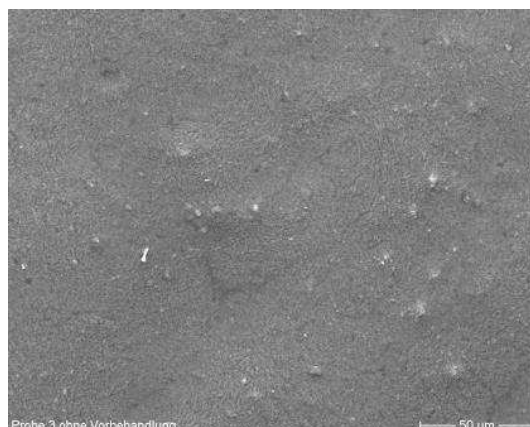


Abbildung A-8: Probe D3; ECCS; ohne Vorbehandlung 400-fach; SE

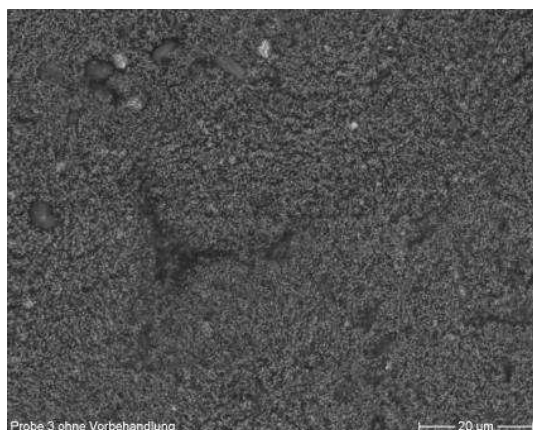


Abbildung A-9: Probe D3; ECCS; ohne Vorbehandlung 1.000-fach; BE

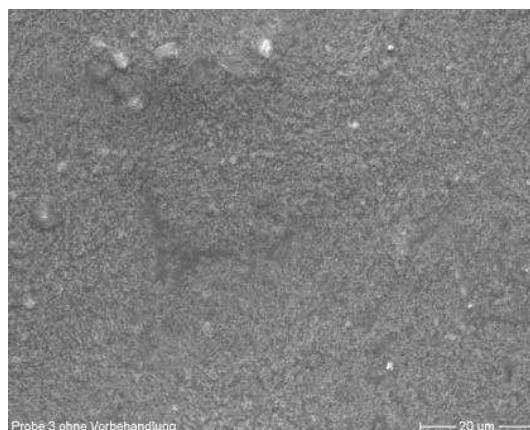


Abbildung A-10: Probe D3; ECCS; ohne Vorbehandlung 1.000-fach; SE

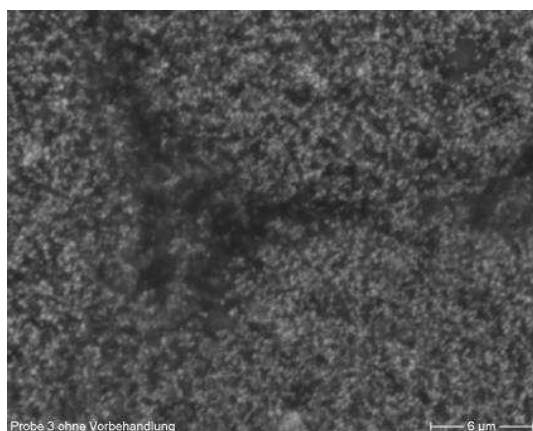


Abbildung A-11: Probe D3; ECCS; ohne Vorbehandlung 3.000-fach; BE

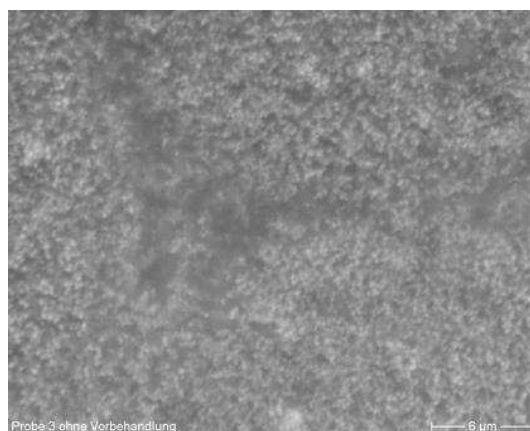
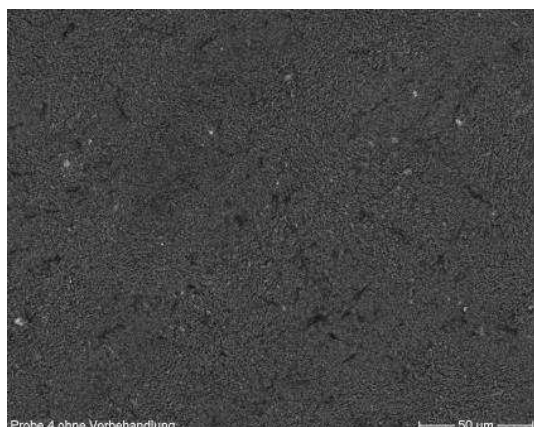
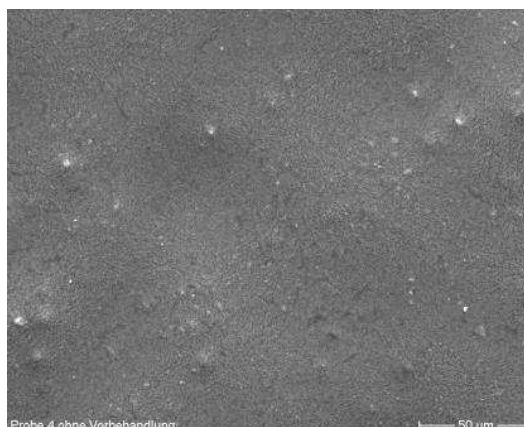


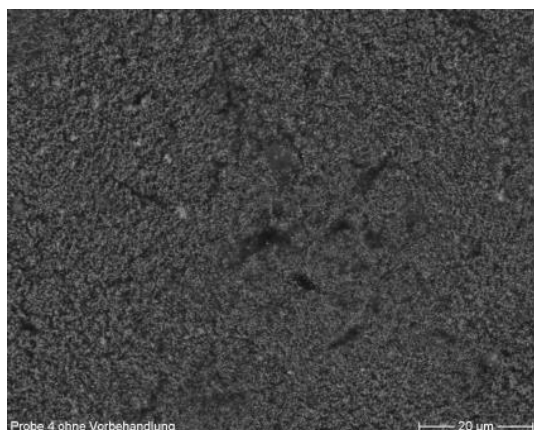
Abbildung A-12: Probe D3; ECCS; ohne Vorbehandlung 3.000-fach; SE

Probe D4: ohne Vorbehandlung CFPA

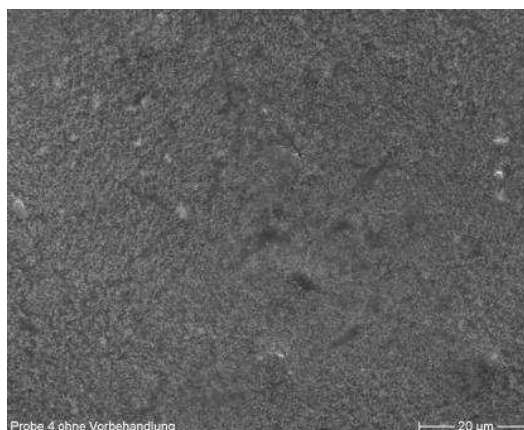
**Abbildung A-13: Probe D4; CFPA; ohne
Vorbehandlung 400-fach; BE**



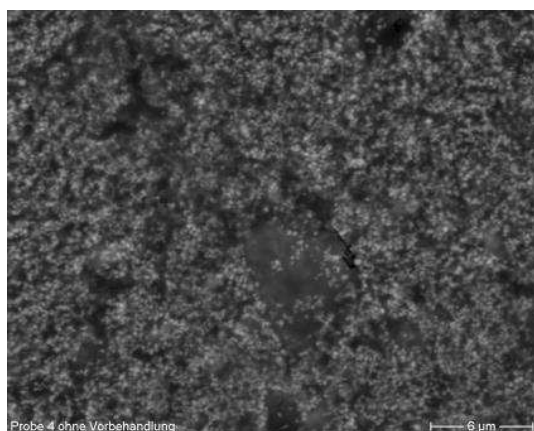
**Abbildung A-14: Probe D4; CFPA; ohne
Vorbehandlung 400-fach; SE**



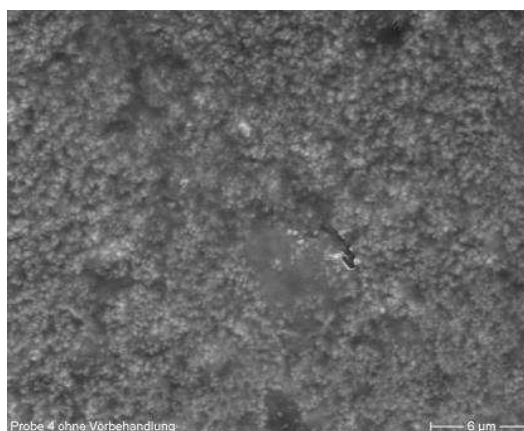
**Abbildung A-15: Probe D4; CFPA; ohne
Vorbehandlung 1.000-fach; BE**



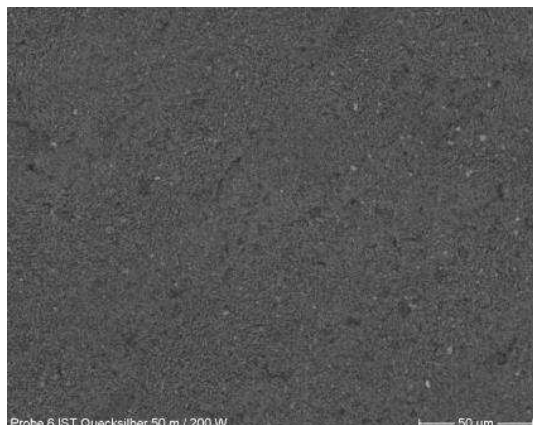
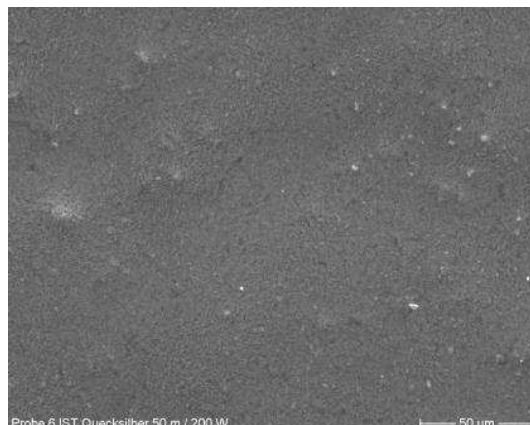
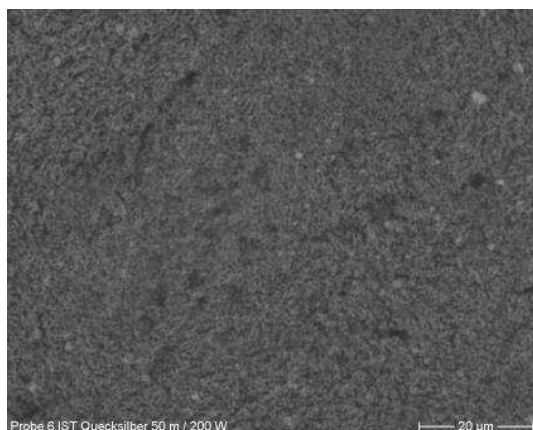
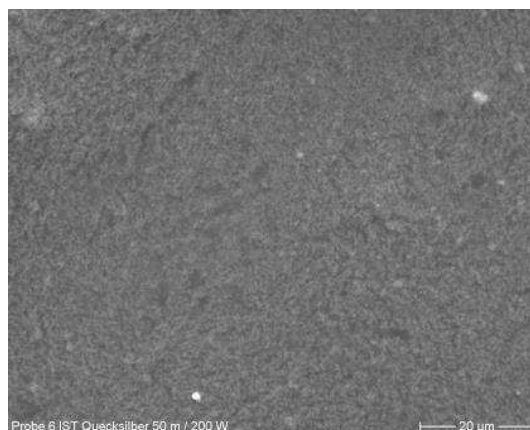
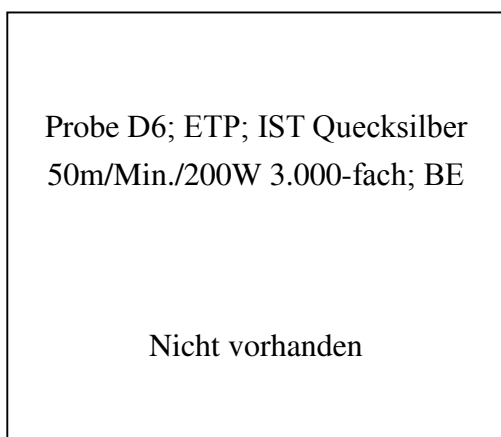
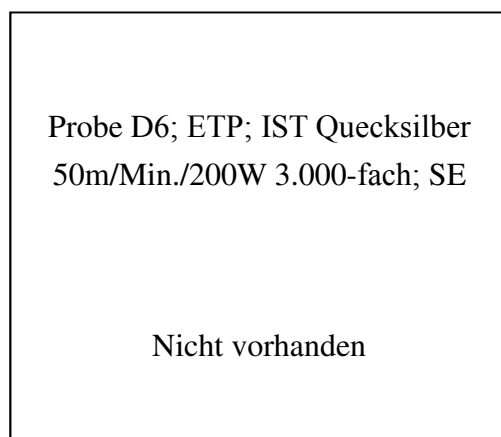
**Abbildung A-16: Probe D4; CFPA; ohne
Vorbehandlung 1.000-fach; SE**

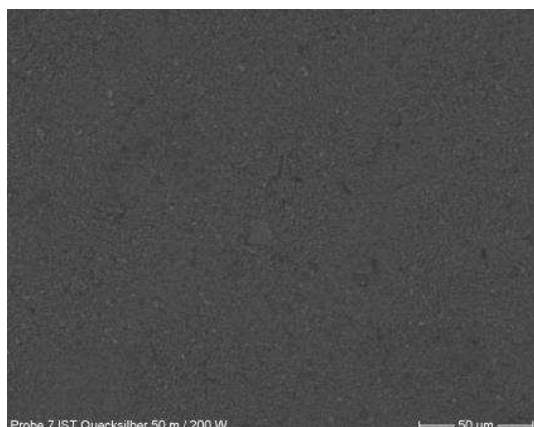


**Abbildung A-17: Probe D4; CFPA; ohne
Vorbehandlung 3.000-fach; BE**

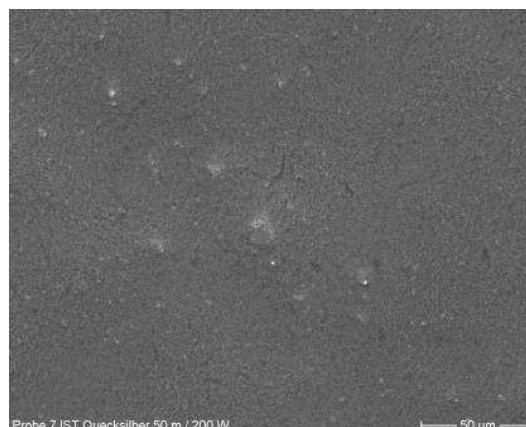


**Abbildung A-18: Probe D4; CFPA; ohne
Vorbehandlung 3.000-fach; SE**

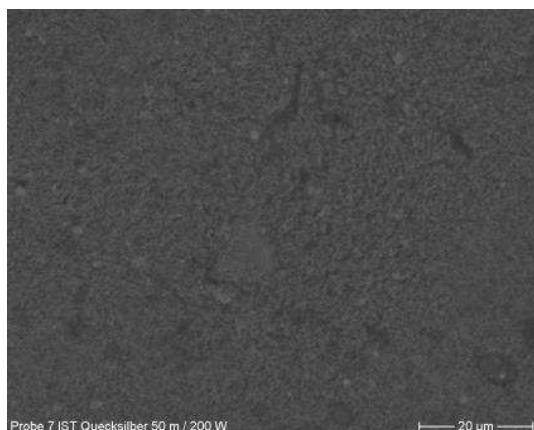
Probe D6: IST Quecksilber 50m/Min./200W ETP**Abbildung A-19: Probe D6; ETP; IST Quecksilber
50m/Min./200W 400-fach; BE****Abbildung A-20: Probe D6; ETP; IST Quecksilber
50m/Min./200W 400-fach; SE****Abbildung A-21: Probe D6; ETP; IST Quecksilber
50m/Min./200W 1.000-fach; BE****Abbildung A-22: Probe D6; ETP; IST Quecksilber
50m/Min./200W 1.000-fach; SE****Abbildung A-23: Probe D6; ETP; IST Quecksilber
50m/Min./200W 3.000-fach; BE****Abbildung A-24: Probe D6; ETP; IST Quecksilber
50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

Probe D7: IST Quecksilber 50m/Min./200W ECCS

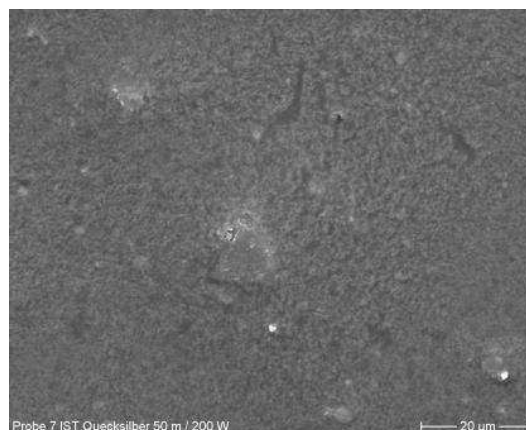
**Abbildung A-25: Probe D7; ECCS; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 400-fach; BE**



**Abbildung A-26: Probe D7; ECCS; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 400-fach; SE**



**Abbildung A-27: Probe D7; ECCS; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 1.000-fach; BE**



**Abbildung A-28: Probe D7; ECCS; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 1.000-fach; SE**

Probe D7; ECCS; IST Quecksilber
50m/Min./200W 3.000-fach; BE

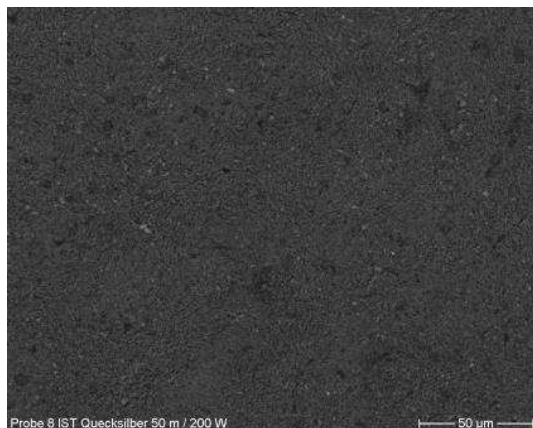
Nicht vorhanden

Probe D7; ECCS; IST Quecksilber
50m/Min./200W 3.000-fach; SE

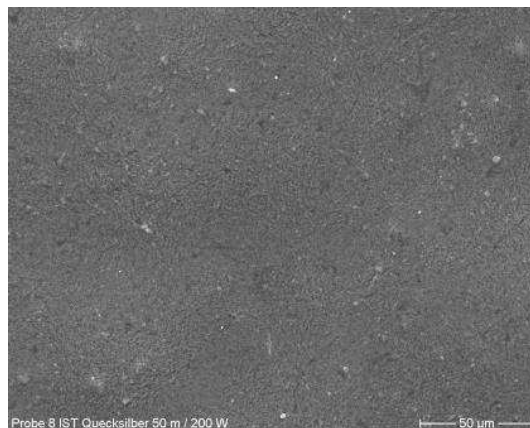
Nicht vorhanden

**Abbildung A-29: Probe D7; ECCS; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 3.000-fach; BE**

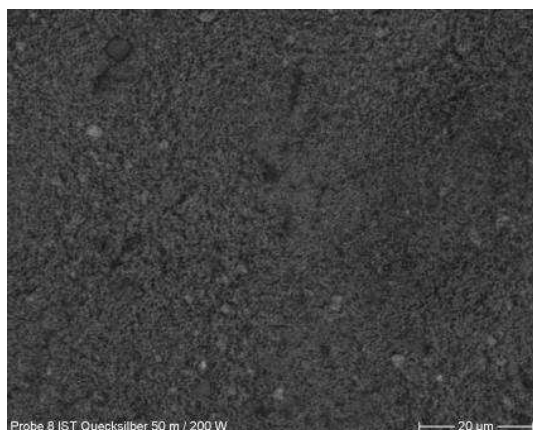
**Abbildung A-30: Probe D7; ECCS; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

Probe D8: IST Quecksilber 50m/Min./200W CFPA

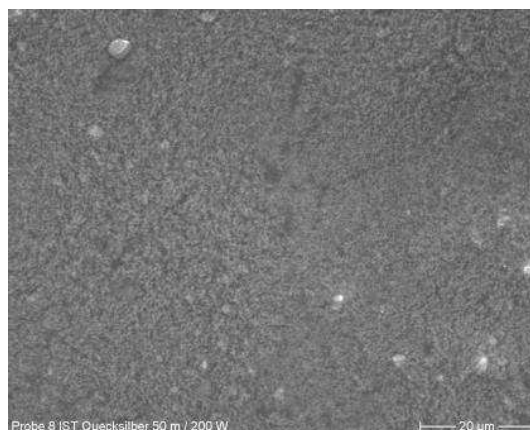
**Abbildung A-31: Probe D8; CFPA; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 400-fach; BE**



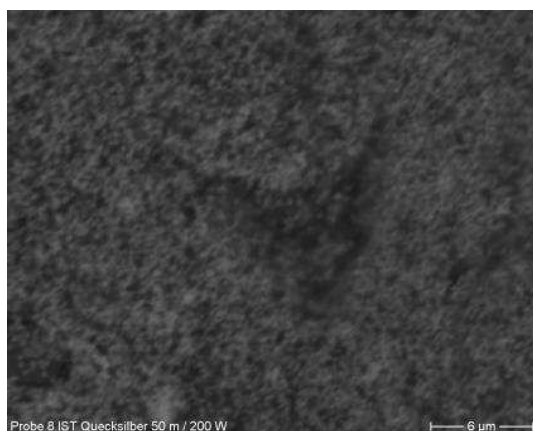
**Abbildung A-32: Probe D8; CFPA; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 400-fach; SE**



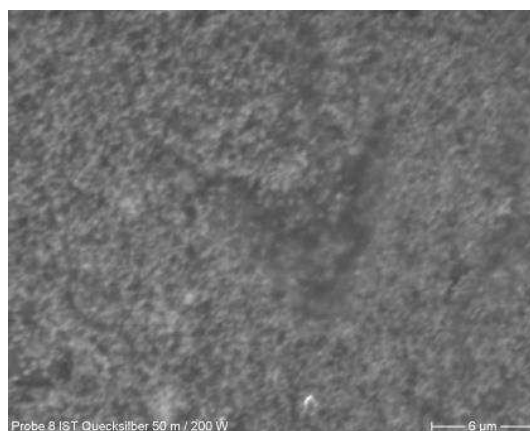
**Abbildung A-33: Probe D8; CFPA; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 1.000-fach; BE**



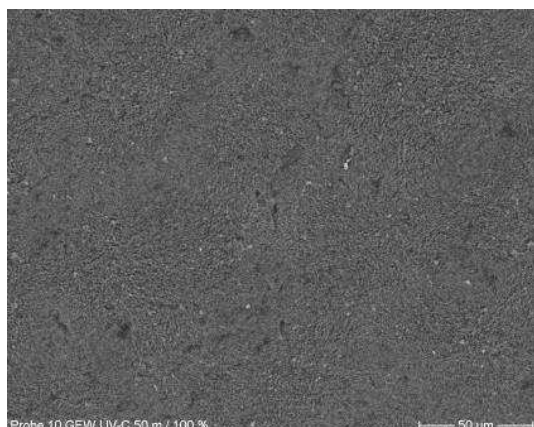
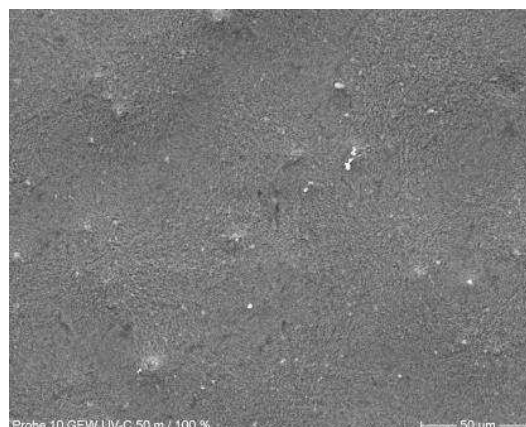
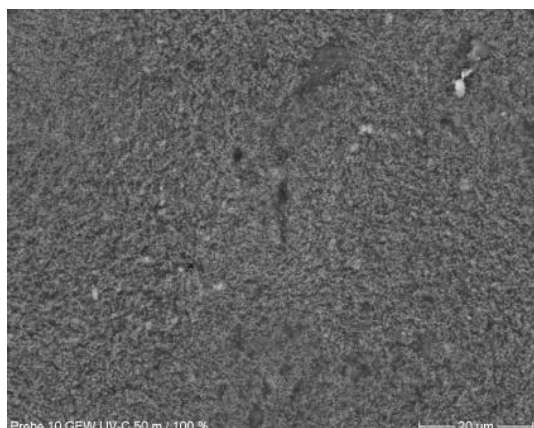
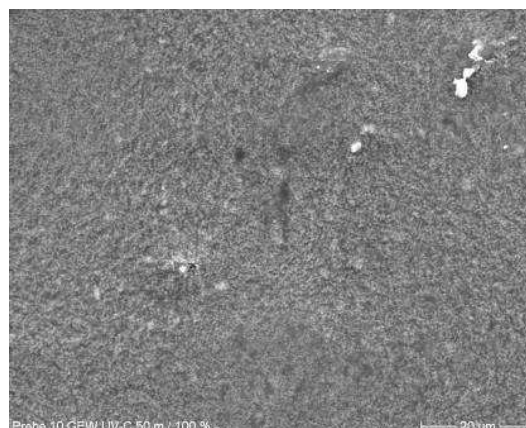
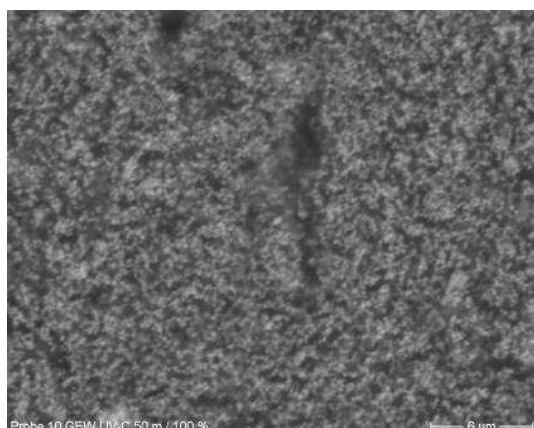
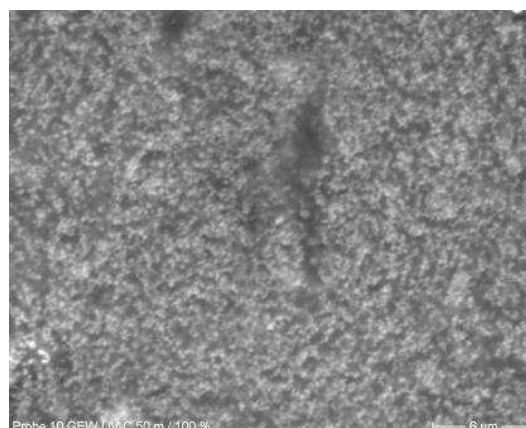
**Abbildung A-34: Probe D8; CFPA; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 1.000-fach; SE**

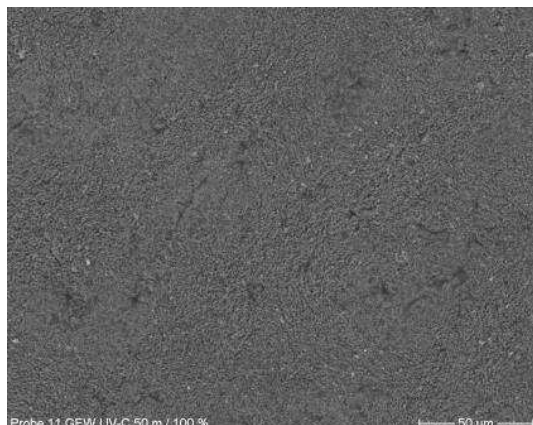
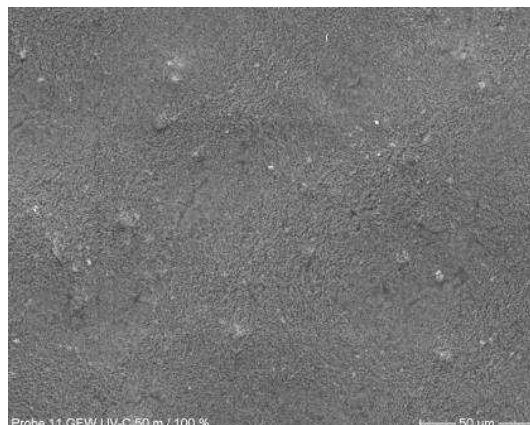
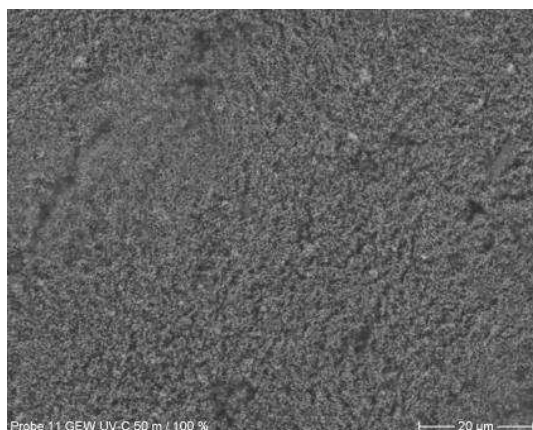
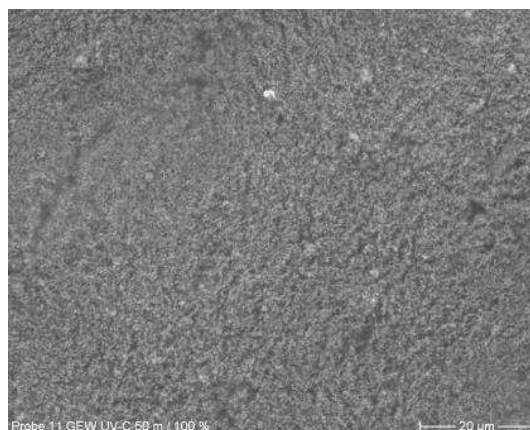
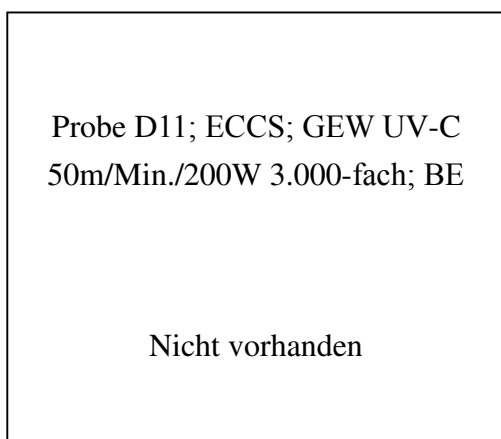
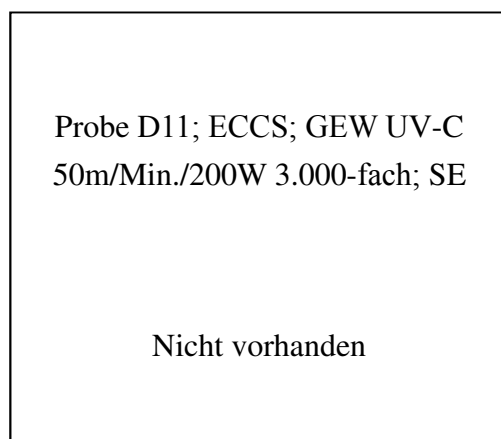


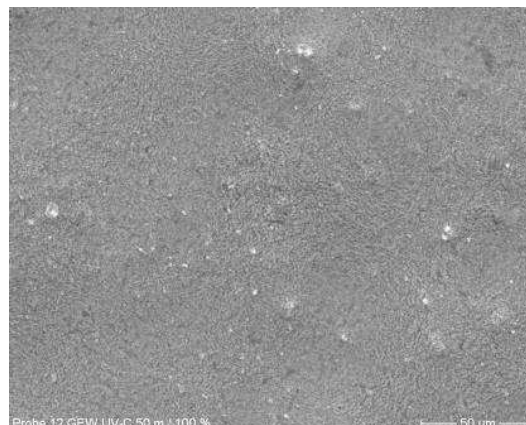
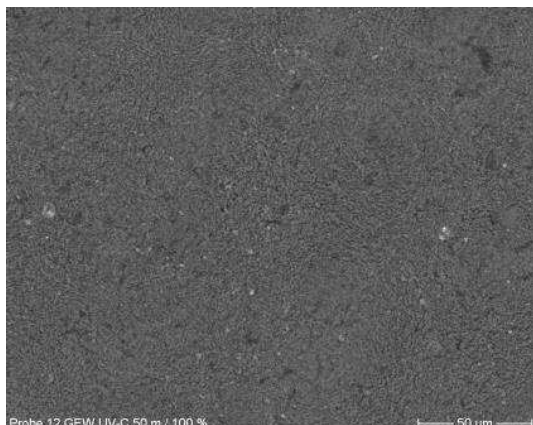
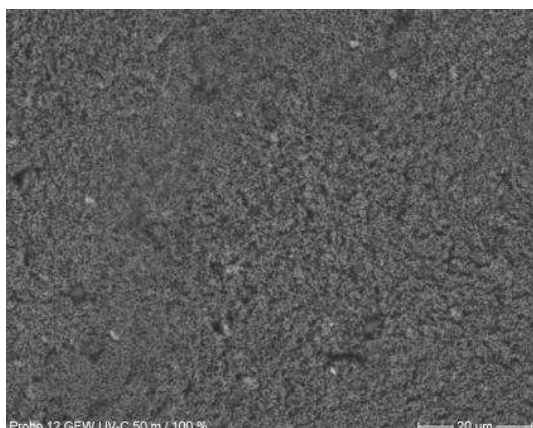
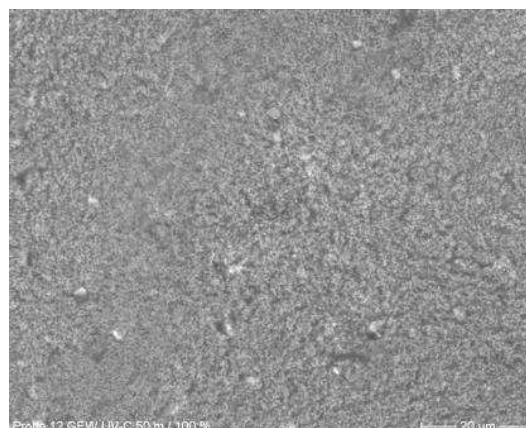
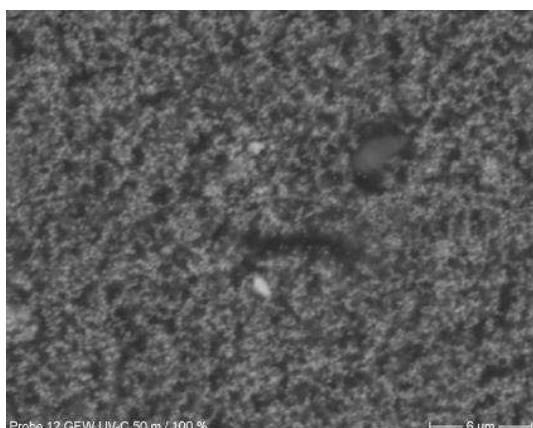
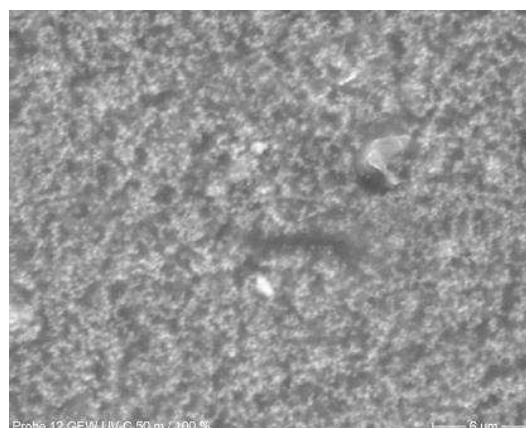
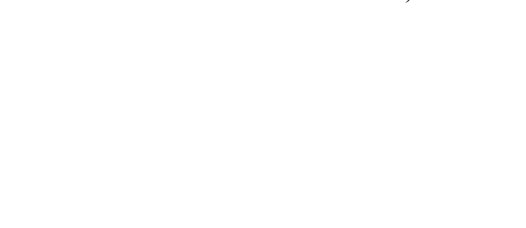
**Abbildung A-35: Probe D8; CFPA; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 3.000-fach; BE**

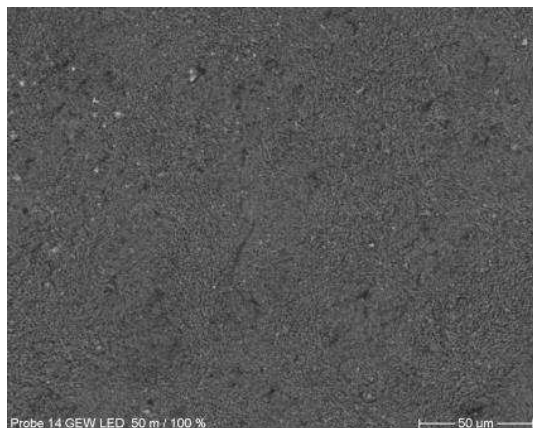


**Abbildung A-36: Probe D8; CFPA; IST
Quecksilber 50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

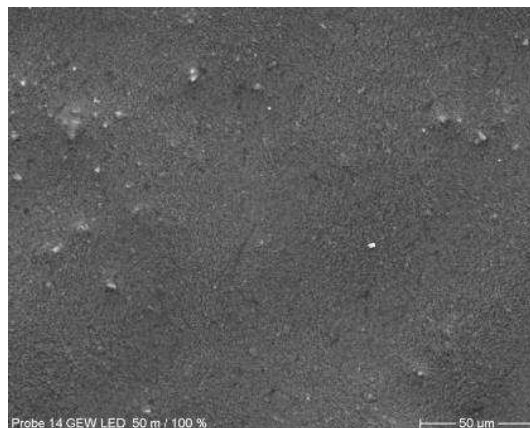
Probe D10: GEW UV-C 50m/Min./200W ETP**Abbildung A-37: Probe D10; ETP; GEW UV-C
50m/Min./200W 400-fach; BE****Abbildung A-38: Probe D10; ETP; GEW UV-C
50m/Min./200W 400-fach; SE****Abbildung A-39: Probe D10; ETP; GEW UV-C
50m/Min./200W 1.000-fach; BE****Abbildung A-40: Probe D10; ETP; GEW UV-C
50m/Min./200W 1.000-fach; SE****Abbildung A-41: Probe D10; ETP; GEW UV-C
50m/Min./200W 3.000-fach; BE****Abbildung A-42: Probe D10; ETP; GEW UV-C
50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

Probe D11: GEW UV-C 50m/Min./200W ECCS**Abbildung A-43: Probe D11; ECCS; GEW UV-C
50m/Min./200W 400-fach; BE****Abbildung A-44: Probe D11; ECCS; GEW UV-C
50m/Min./200W 400-fach; SE****Abbildung A-45: Probe D11; ECCS; GEW UV-C
50m/Min./200W 1.000-fach; BE****Abbildung A-46: Probe D11; ECCS; GEW UV-C
50m/Min./200W 1.000-fach; SE****Abbildung A-47: Probe D11; ECCS; GEW UV-C
50m/Min./200W 3.000-fach; BE****Abbildung A-48: Probe D11; ECCS; GEW UV-C
50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

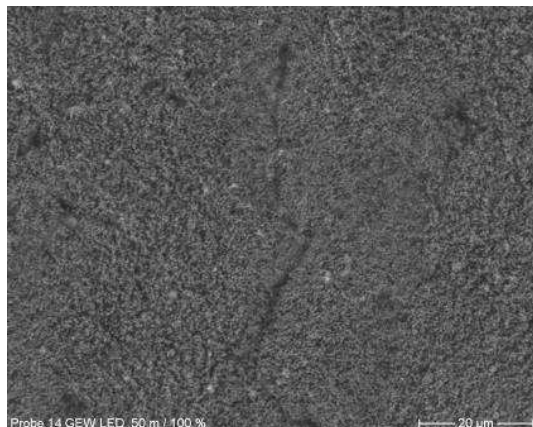
Probe D12: GEW UV-C 50m/Min./200W CFPA**Abbildung A-49: Probe D12; CFPA; GEW UV-C
50m/Min./200W 400-fach; BE****Abbildung A-50: Probe D12; CFPA; GEW UV-C
50m/Min./200W 400-fach; SE****Abbildung A-51: Probe D12; CFPA; GEW UV-C
50m/Min./200W 1.000-fach; BE****Abbildung A-52: Probe D12; CFPA; GEW UV-C
50m/Min./200W 1.000-fach; SE****Abbildung A-53: Probe D12; CFPA; GEW UV-C
50m/Min./200W 3.000-fach; BE****Abbildung A-54: Probe D12; CFPA; GEW UV-C
50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

Probe D14: GEW LED 50m/Min./200W ETP

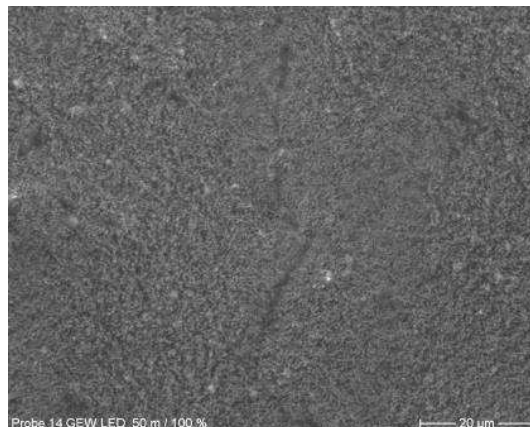
**Abbildung A-55: Probe D14; ETP; GEW LED
50m/Min./200W 400-fach; BE**



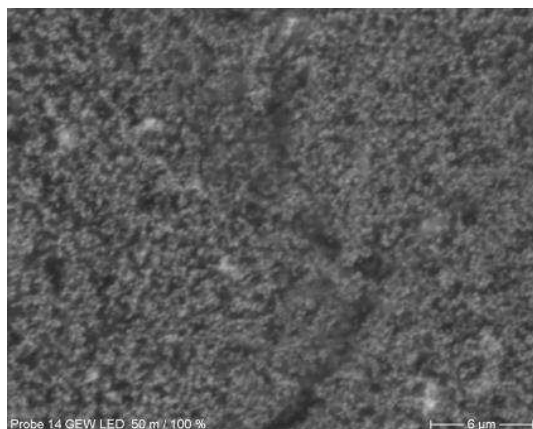
**Abbildung A-56: Probe D14; ETP; GEW LED
50m/Min./200W 400-fach; SE**



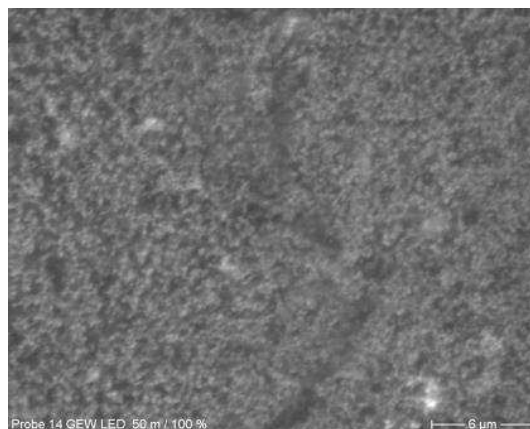
**Abbildung A-57: Probe D14; ETP; GEW LED
50m/Min./200W 1.000-fach; BE**



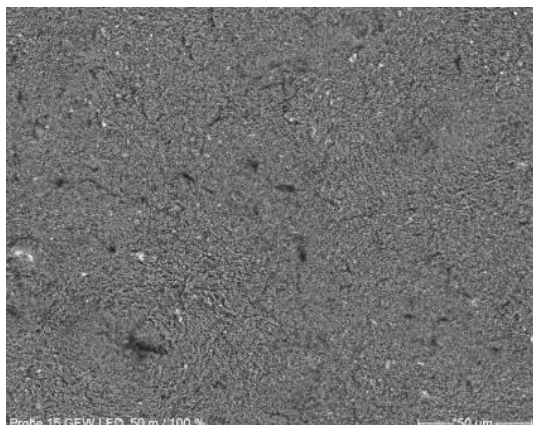
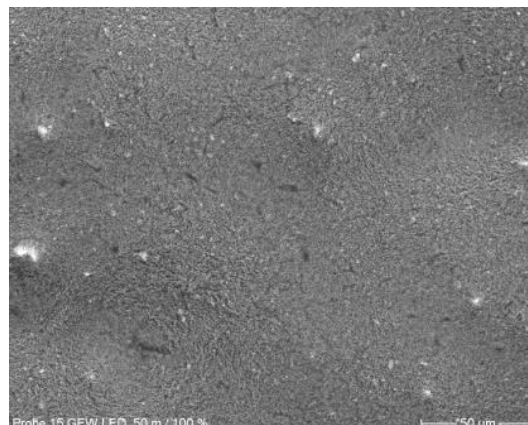
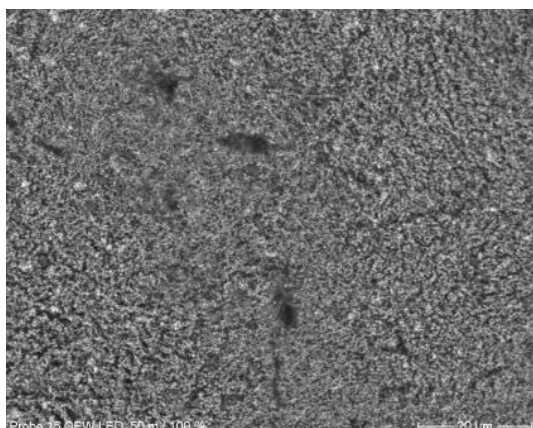
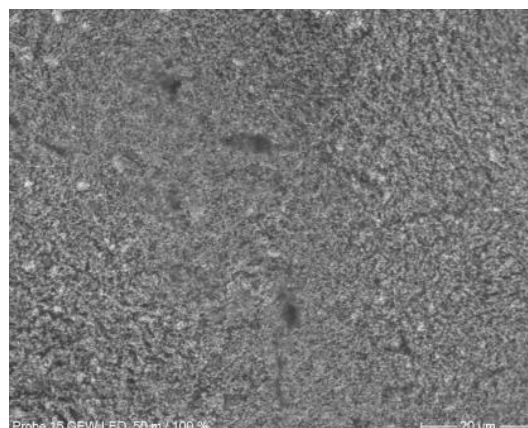
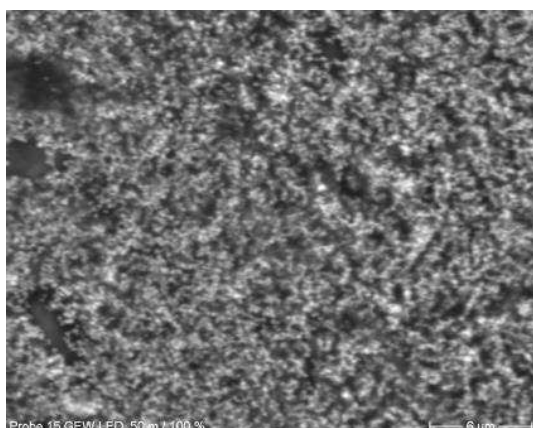
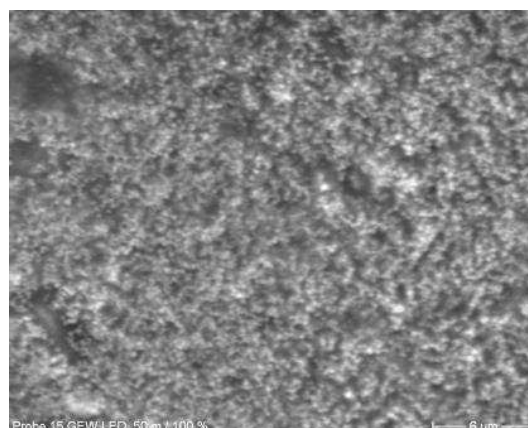
**Abbildung A-58: Probe D14; ETP; GEW LED
50m/Min./200W 1.000-fach; SE**

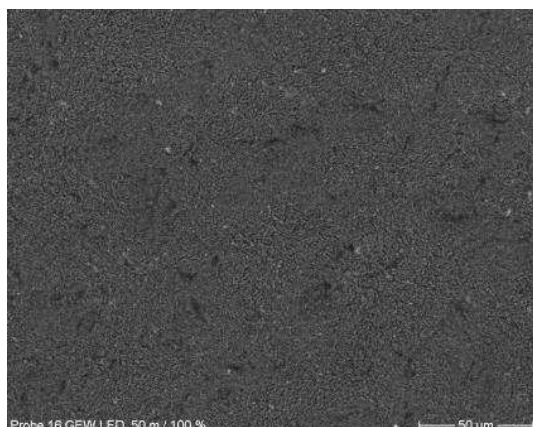
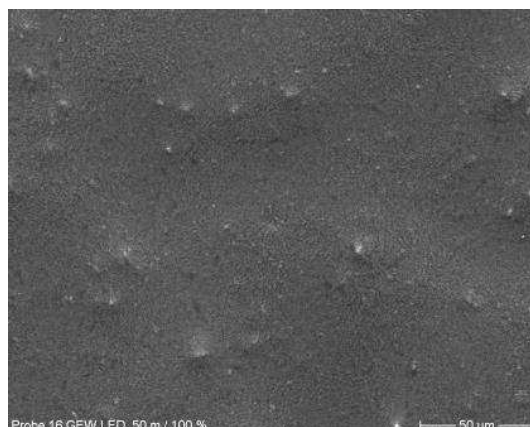
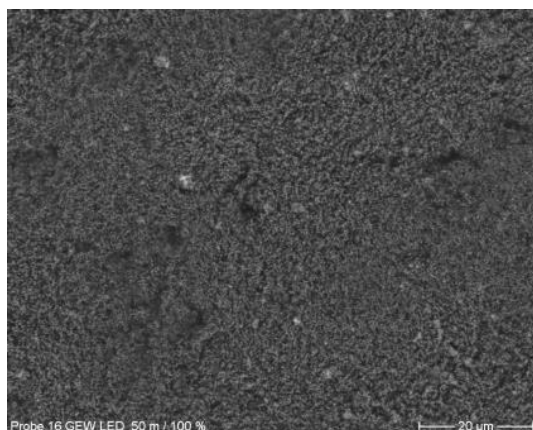
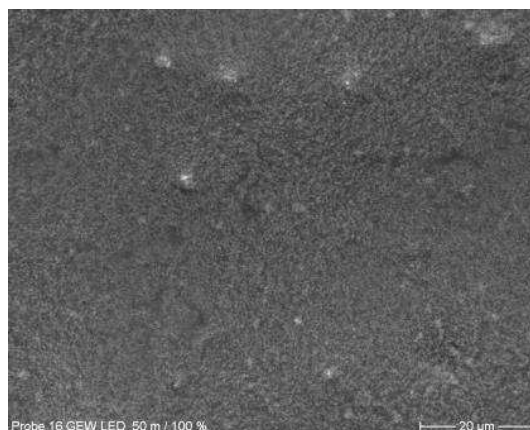
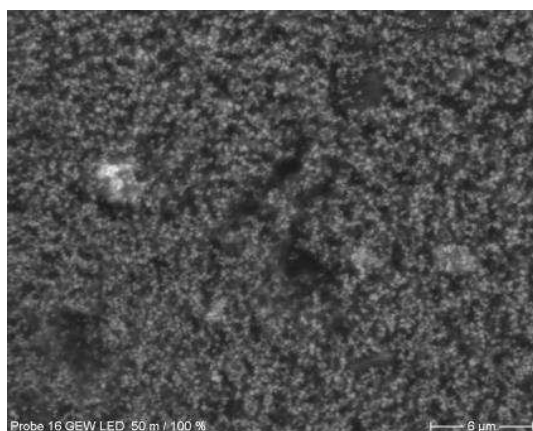
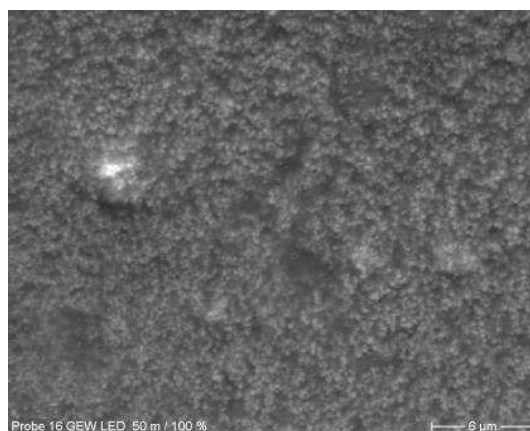


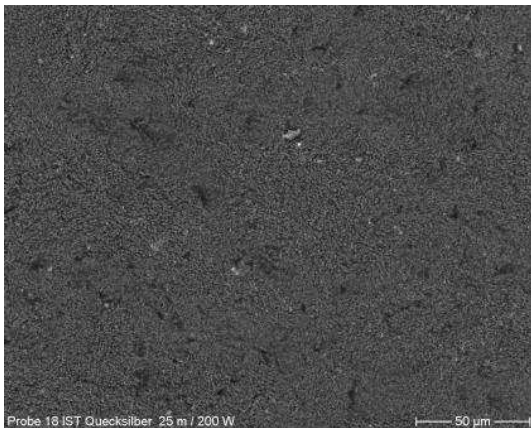
**Abbildung A-59: Probe D14; ETP; GEW LED
50m/Min./200W 3.000-fach; BE**



**Abbildung A-60: Probe D14; ETP; GEW LED
50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

Probe D15: GEW LED 50m/Min./200W ECCS**Abbildung A-61: Probe D15; ECCS; GEW LED 50m/Min./200W 400-fach; BE****Abbildung A-62: Probe D15; ECCS; GEW LED 50m/Min./200W 400-fach; SE****Abbildung A-63: Probe D15; ECCS; GEW LED 50m/Min./200W 1.000-fach; BE****Abbildung A-64: Probe D15; ECCS; GEW LED 50m/Min./200W 1.000-fach; SE****Abbildung A-65: Probe D15; ECCS; GEW LED 50m/Min./200W 3.000-fach; BE****Abbildung A-66: Probe D15; ECCS; GEW LED 50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

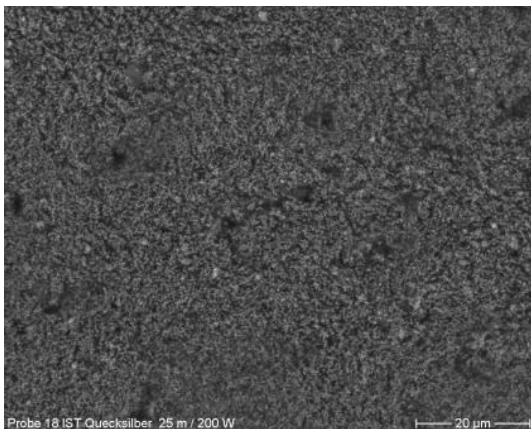
Probe D16: GEW LED 50m/Min./200W CFPA**Abbildung A-67: Probe D16; CFPA; GEW LED 50m/Min./200W 400-fach; BE****Abbildung A-68: Probe D16; CFPA; GEW LED 50m/Min./200W 400-fach; SE****Abbildung A-69: Probe D16; CFPA; GEW LED 50m/Min./200W 1.000-fach; BE****Abbildung A-70: Probe D16; CFPA; GEW LED 50m/Min./200W 1.000-fach; SE****Abbildung A-71: Probe D16; CFPA; GEW LED 50m/Min./200W 3.000-fach; BE****Abbildung A-72: Probe D16; CFPA; GEW LED 50m/Min./200W 3.000-fach; SE**

Probe D18: IST Quecksilber 25m/Min./200W ETP

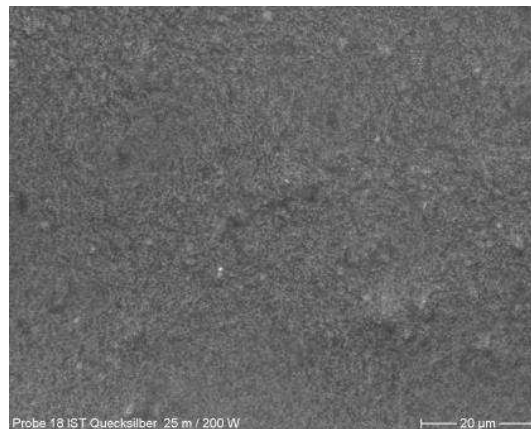
**Abbildung A-73: Probe D18; ETP; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 400-fach; BE**



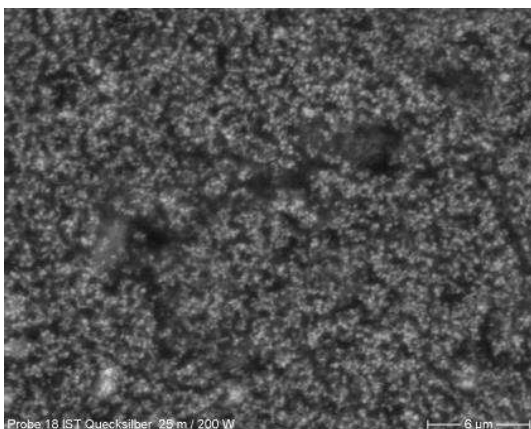
**Abbildung A-74: Probe D18; ETP; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 400-fach; SE**



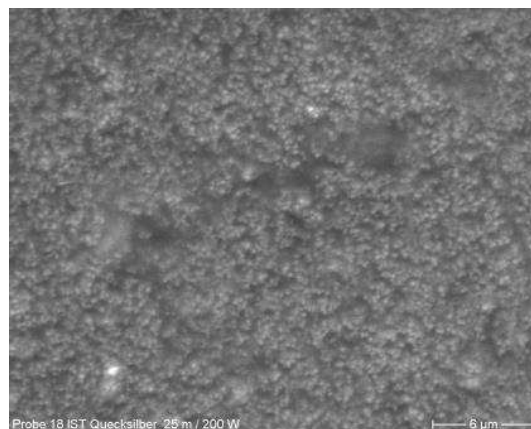
**Abbildung A-75: Probe D18; ETP; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 1.000-fach; BE**



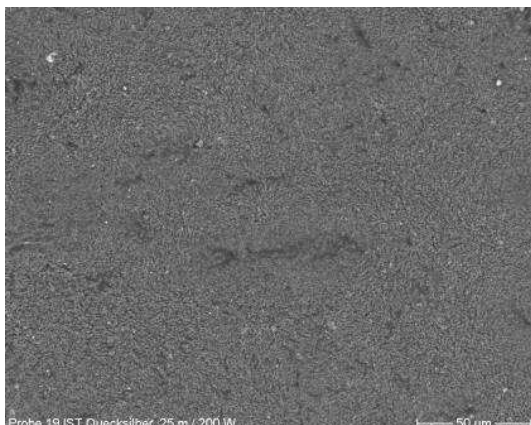
**Abbildung A-76: Probe D18; ETP; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 1.000-fach; SE**



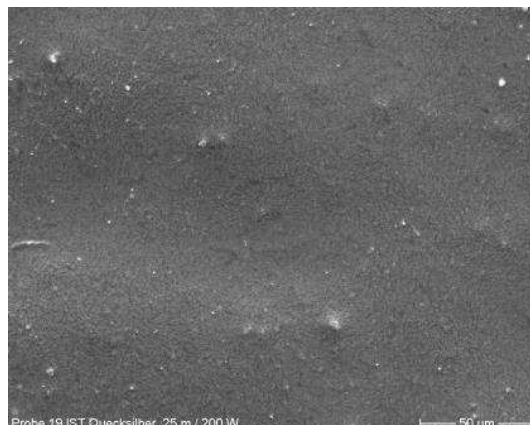
**Abbildung A-77: Probe D18; ETP; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 3.000-fach; BE**



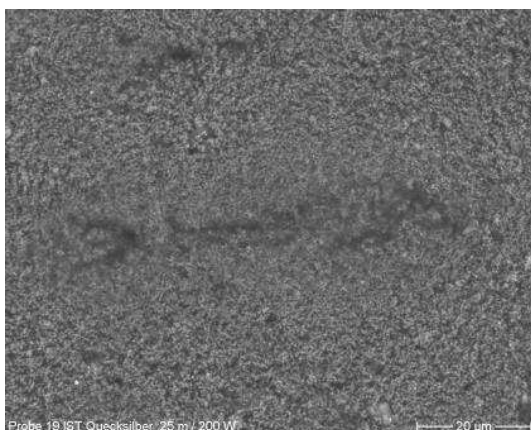
**Abbildung A-78: Probe D18; ETP; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 3.000-fach; SE**

Probe D19: IST Quecksilber 25m/Min./200W ECCS

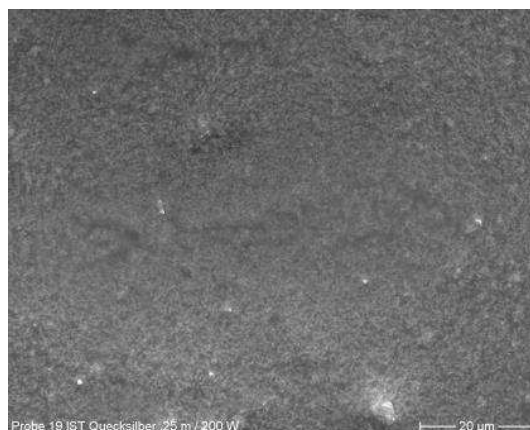
**Abbildung A-79: Probe D19; ECCS; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 400-fach; BE**



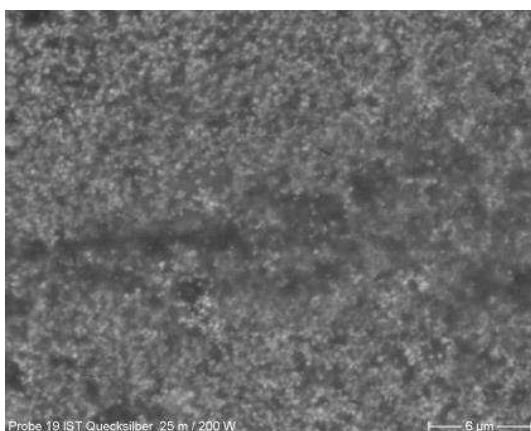
**Abbildung A-80: Probe D19; ECCS; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 400-fach; SE**



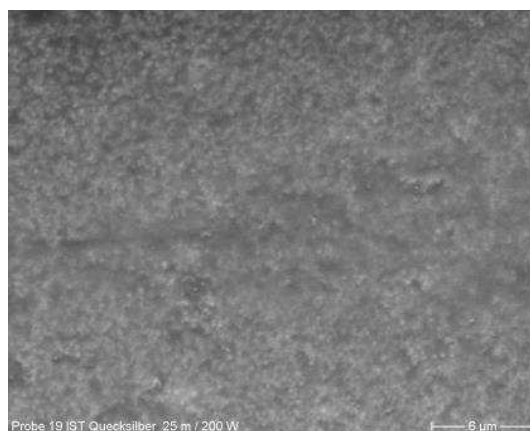
**Abbildung A-81: Probe D19; ECCS; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 1.000-fach; BE**



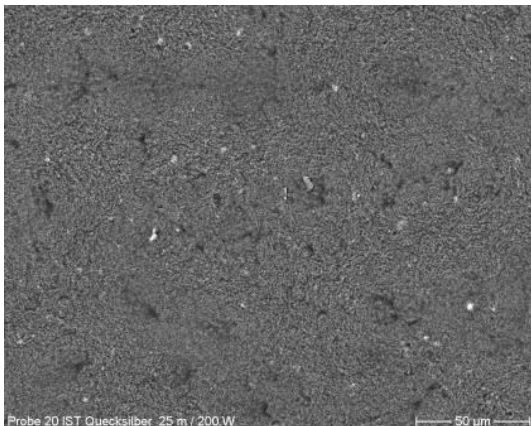
**Abbildung A-82: Probe D19; ECCS; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 1.000-fach; SE**



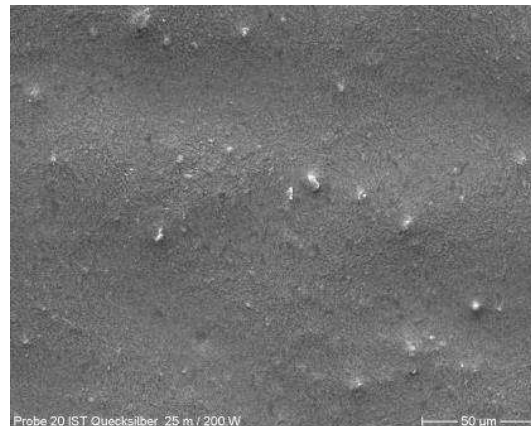
**Abbildung A-83: Probe D19; ECCS; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 3.000-fach; BE**



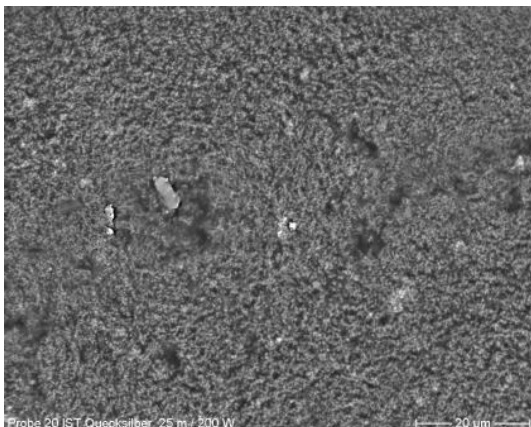
**Abbildung A-84: Probe D19; ECCS; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 3.000-fach; SE**

Probe D20: IST Quecksilber 25m/Min./200W CFPA

**Abbildung A-85: Probe D20; CFPA; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 400-fach; BE**



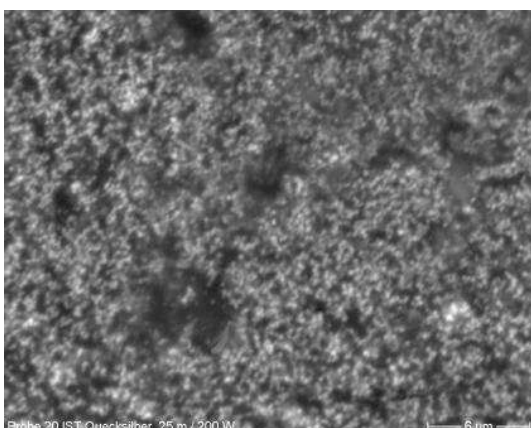
**Abbildung A-86: Probe D20; CFPA; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 400-fach; SE**



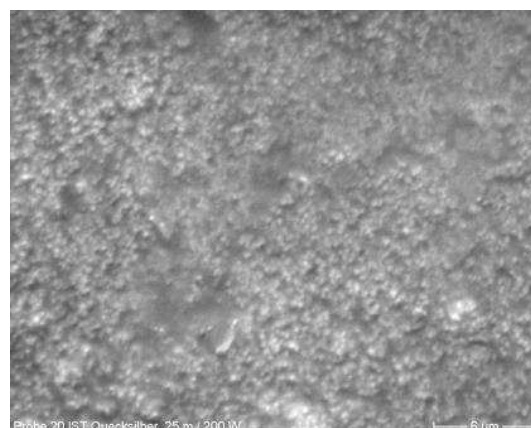
**Abbildung A-87: Probe D20; CFPA; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 1.000-fach; BE**



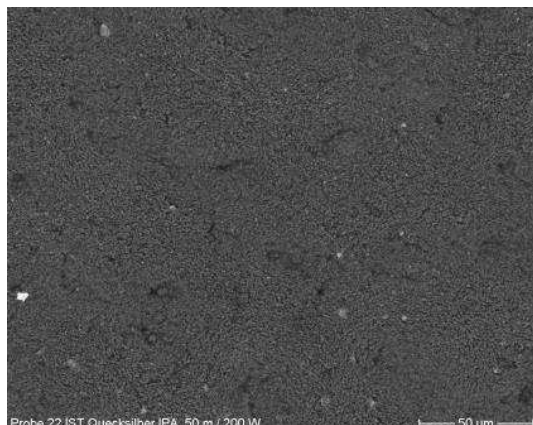
**Abbildung A-88: Probe D20; CFPA ; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 1.000-fach; SE**



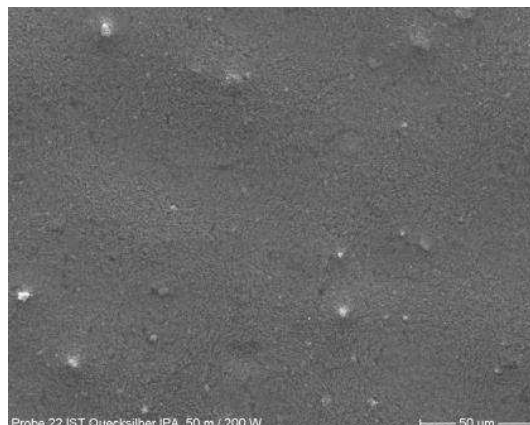
**Abbildung A-89: Probe D20; CFPA; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 3.000-fach; BE**



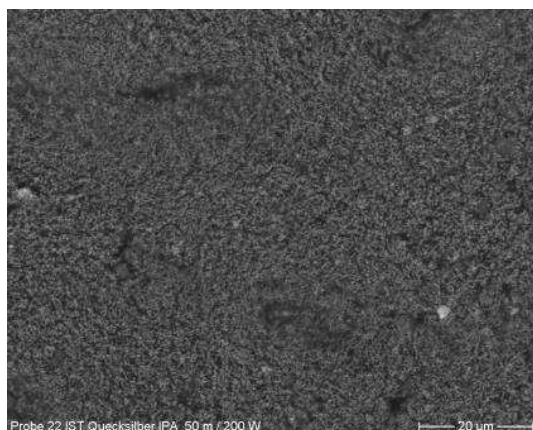
**Abbildung A-90: Probe D20; CFPA; IST
Quecksilber 25m/Min./200 W 3.000-fach; SE**

Probe D22: IST Quecksilber IPA 50m/Min./200W ETP

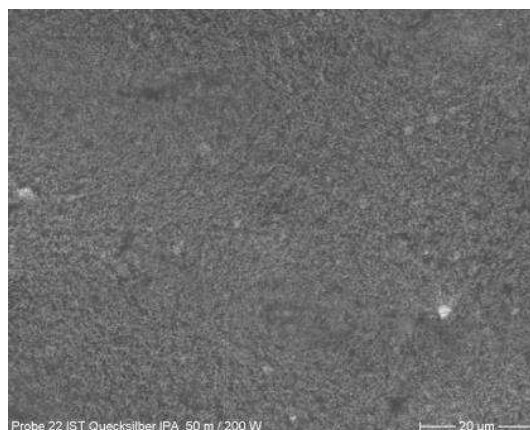
**Abbildung A-91: Probe D22; ETP; IPA-IST
Quecksilber 50m/Min./200 W 400-fach; BE**



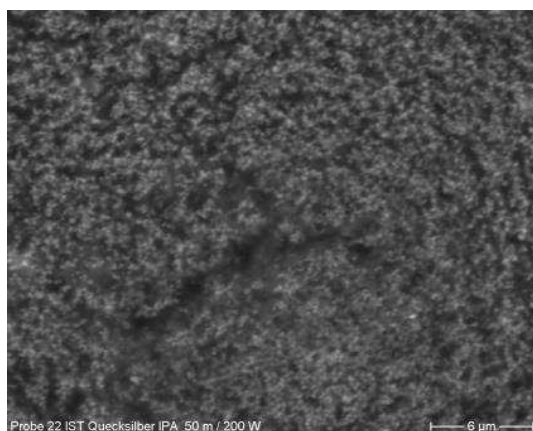
**Abbildung A-92: Probe D22; ETP; IPA-IST
Quecksilber 50m/Min./200 W 400-fach; SE**



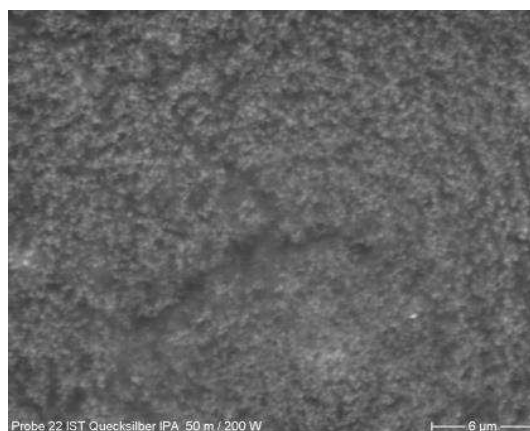
**Abbildung A-93: Probe D22; ETP; IPA-IST
Quecksilber 50m/Min./200 W 1.000-fach; BE**



**Abbildung A-94: Probe D22; ETP ; IPA-IST
Quecksilber 50m/Min./200 W 1.000-fach; SE**



**Abbildung A-95: Probe D22; ETP; IPA-IST
Quecksilber 50m/Min./200 W 3.000-fach; BE**



**Abbildung A-96: Probe D22; ETP; IPA-IST
Quecksilber 50m/Min./200 W 3.000-fach; SE**

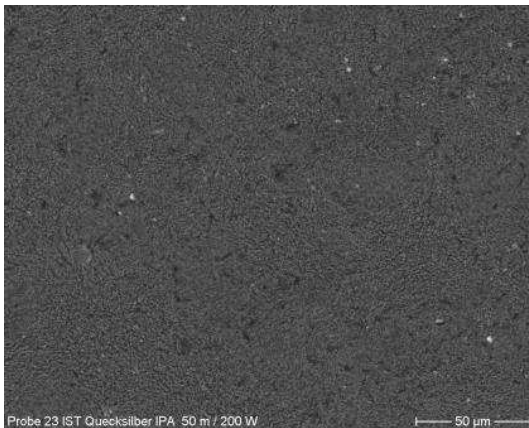
Probe D23: IST Quecksilber IPA 50m/Min./200W ECCS

Abbildung A-97: Probe D23; ECCS; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 400-fach; BE

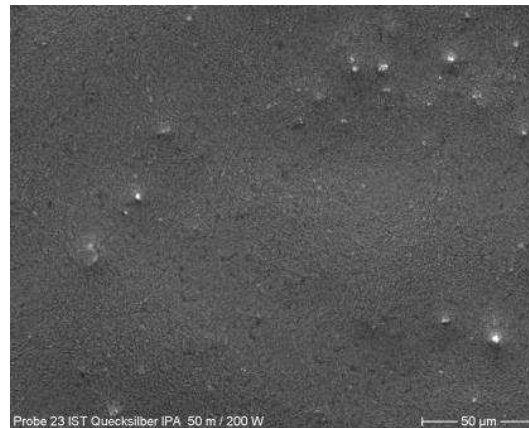


Abbildung A-98: Probe D23; ECCS; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 400-fach; SE

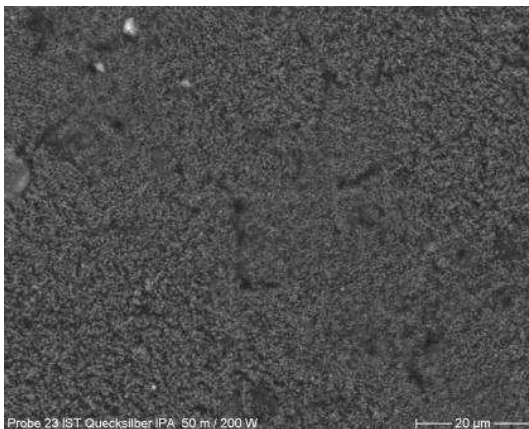


Abbildung A-99: Probe D23; ECCS; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 1.000-fach; BE

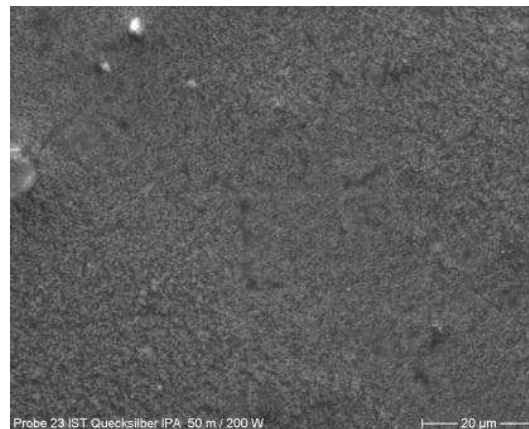


Abbildung A-100: Probe D23; ECCS ; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 1.000-fach; SE

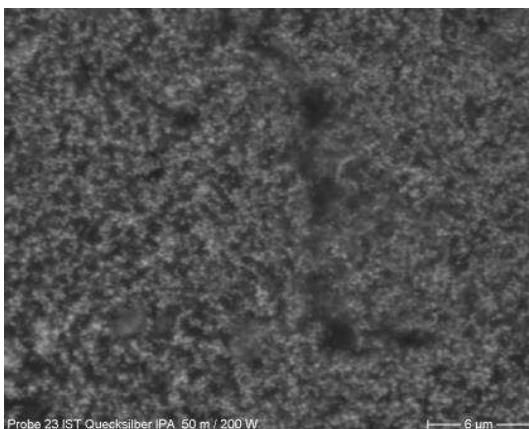


Abbildung A-101: Probe D23; ECCS; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 3.000-fach; BE

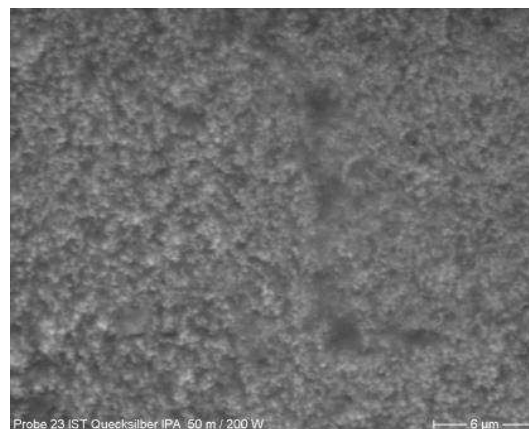


Abbildung A-102: Probe D23; ECCS; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 3.000-fach; SE

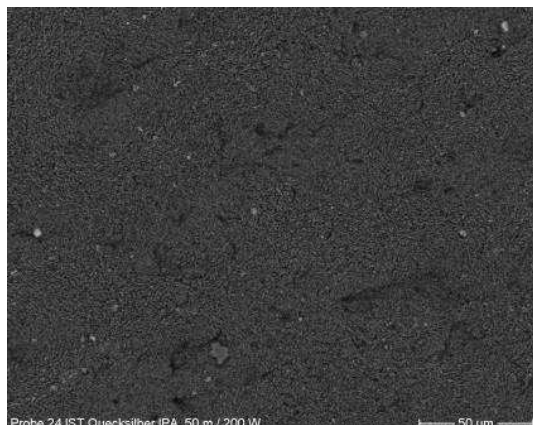
Probe D24: IST Quecksilber IPA 50m/Min./200W CFPA

Abbildung A-103: Probe D24; CFPA; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 400-fach; BE

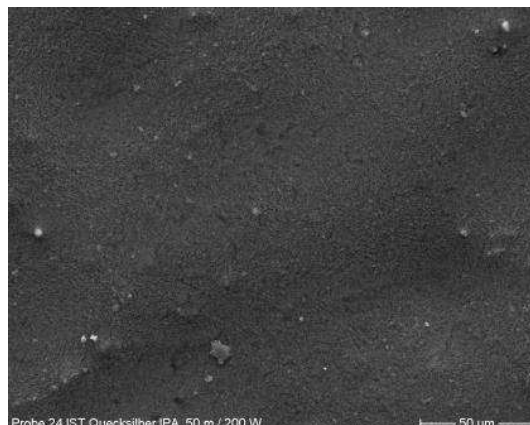


Abbildung A-104: Probe D24; CFPA; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 400-fach; SE

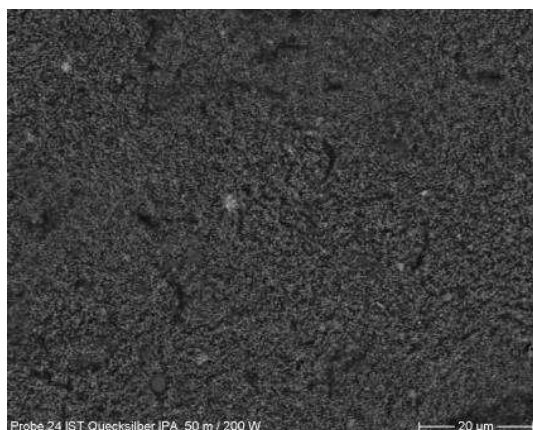


Abbildung A-105: Probe D24; CFPA; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 1.000-fach; BE

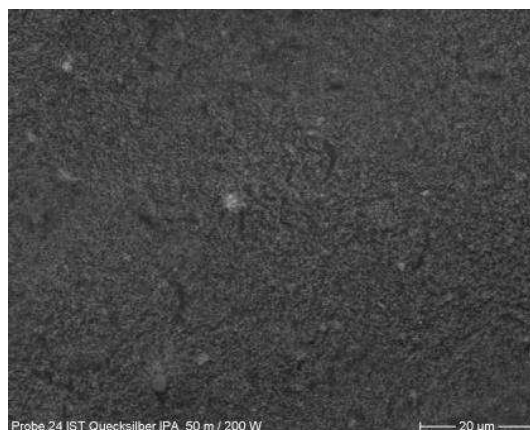


Abbildung A-106: Probe D24; CFPA; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 1.000-fach; SE

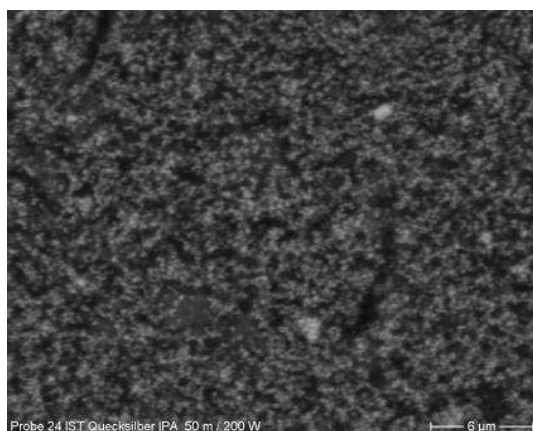


Abbildung A-107: Probe D24; CFPA; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 3.000-fach; BE

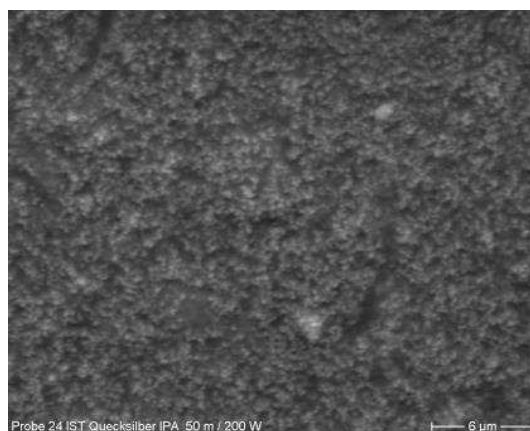
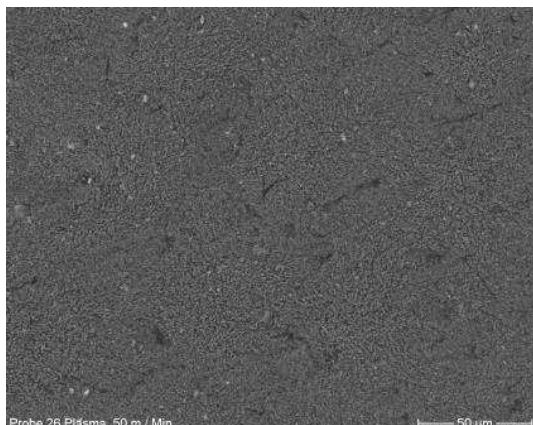
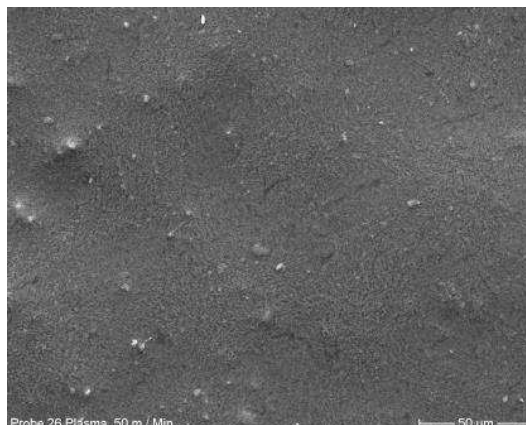


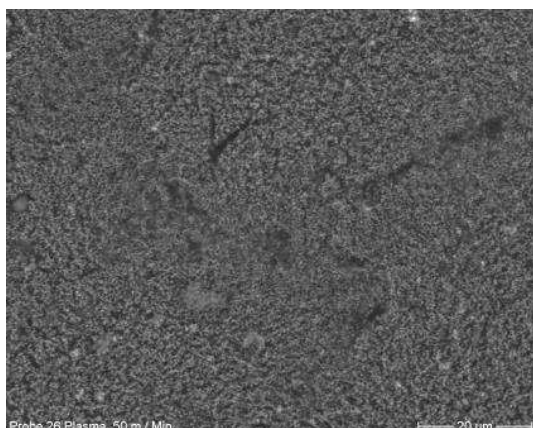
Abbildung A-108: Probe D24; CFPA; IPA-IST Quecksilber 50m/Min./200 W 3.000-fach; SE

Probe D26: Plasma 25m/Min. ETP

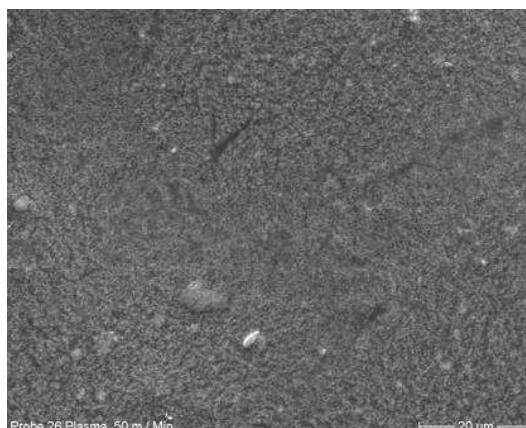
**Abbildung A-109: Probe D26; ETP; Plasma
25m/Min. 400-fach; BE**



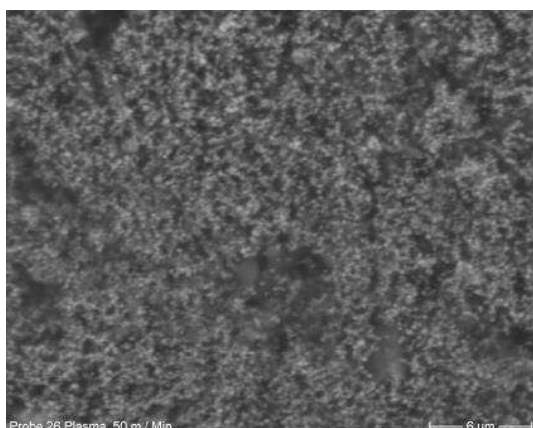
**Abbildung A-110: Probe D26; ETP; Plasma
25m/Min. 400-fach; SE**



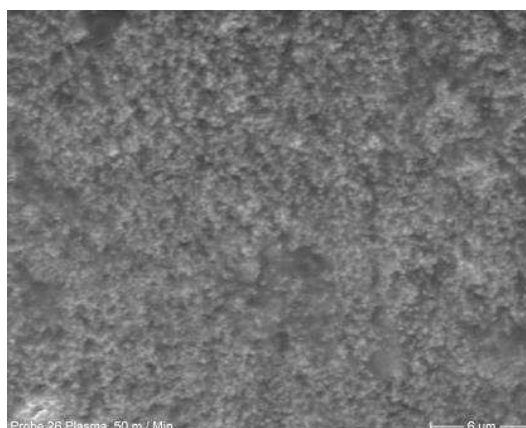
**Abbildung A-111: Probe D26; ETP; Plasma
25m/Min. 1.000-fach; BE**



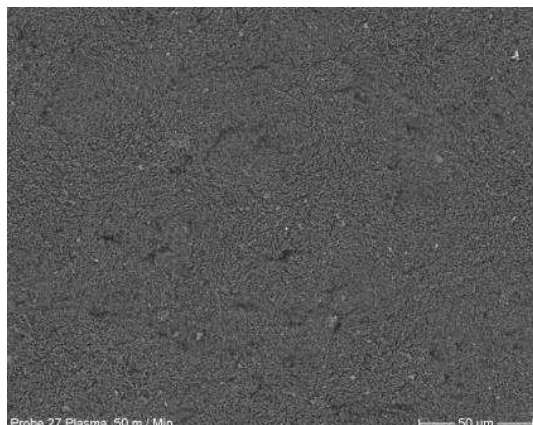
**Abbildung A-112: Probe D26; ETP; Plasma
25m/Min. 1.000-fach; SE**



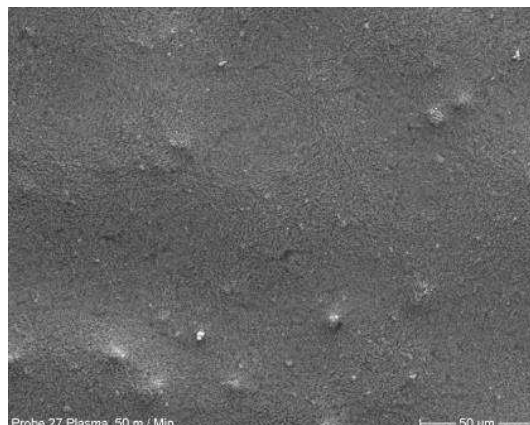
**Abbildung A-113: Probe D26; ETP; Plasma
25m/Min. 3.000-fach; BE**



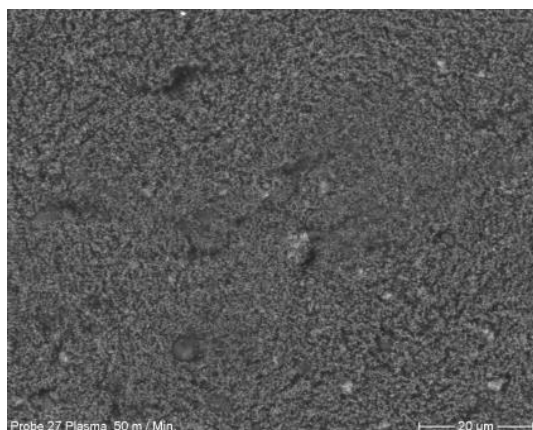
**Abbildung A-114: Probe D26; ETP; Plasma
25m/Min. 3.000-fach; SE**

Probe D27: Plasma 25m/Min. ECCS

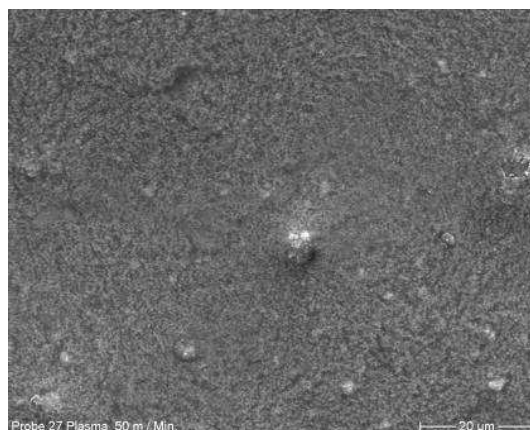
**Abbildung A-115: Probe D27; ECCS; Plasma
25m/Min. 400-fach; BE**



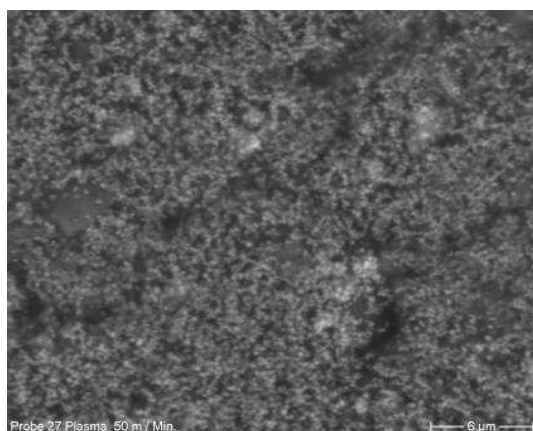
**Abbildung A-116: Probe D27; ECCS; Plasma
25m/Min. 400-fach; SE**



**Abbildung A-117: Probe D27; ECCS; Plasma
25m/Min. 1.000-fach; BE**



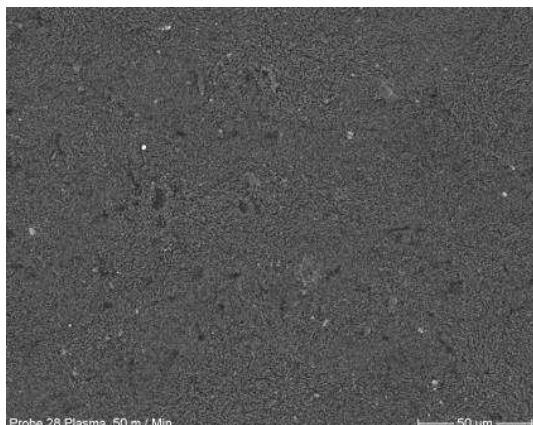
**Abbildung A-118: Probe D27; ECCS; Plasma
25m/Min. 1.000-fach; SE**



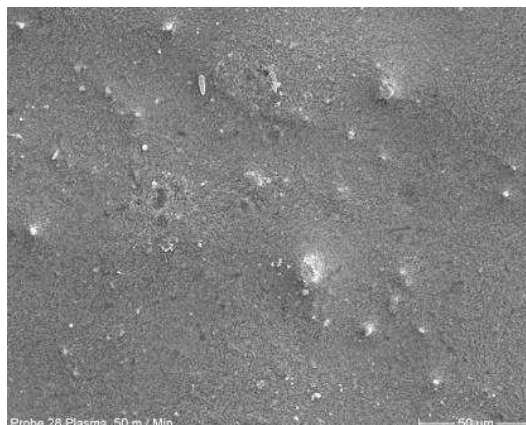
**Abbildung A-119: Probe D27; ECCS; Plasma
25m/Min. 3.000-fach; BE**



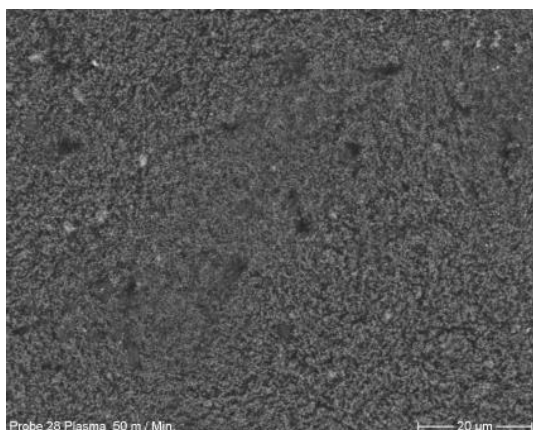
**Abbildung A-120: Probe D27; ECCS; Plasma
25m/Min. 3.000-fach; SE**

Probe D28: Plasma 25m/Min. CFPA

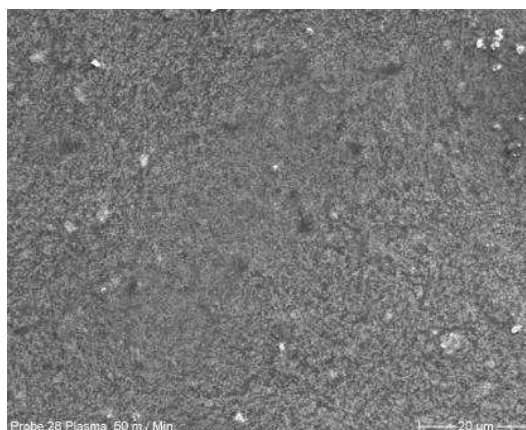
**Abbildung A-121: Probe D28; CFPA; Plasma
25m/Min. 400-fach; BE**



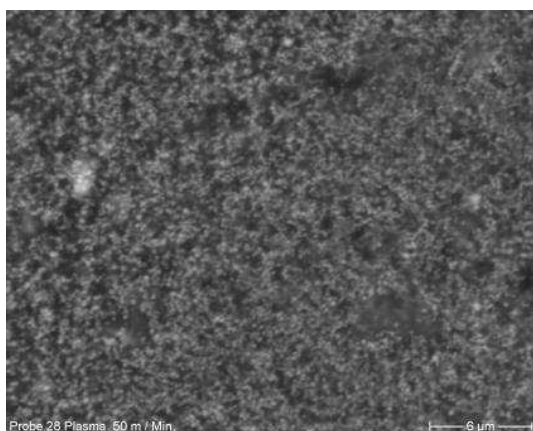
**Abbildung A-122: Probe D28; CFPA; Plasma
25m/Min. 400-fach; SE**



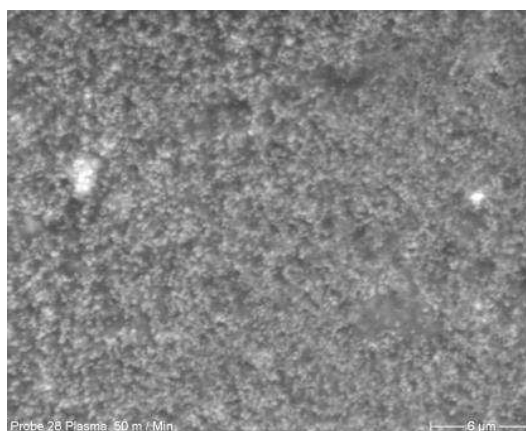
**Abbildung A-123: Probe D28; ECCS; Plasma
25m/Min. 1.000-fach; BE**



**Abbildung A-124: Probe D28; CFPA; Plasma
25m/Min. 1.000-fach; SE**



**Abbildung A-125: Probe D28; CFPA; Plasma
25m/Min. 3.000-fach; BE**



**Abbildung A-126: Probe D28; CFPA; Plasma
25m/Min. 3.000-fach; SE**

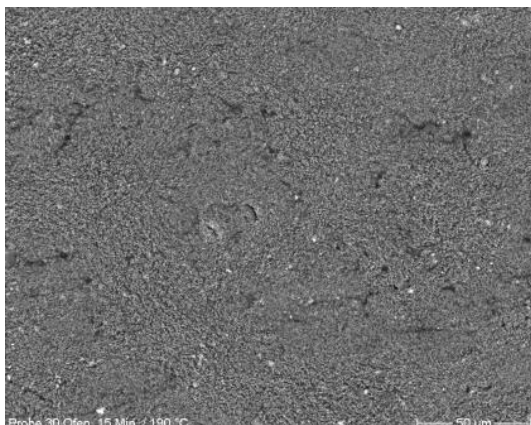
Probe D30: Ofen 15 Min./190°C ETP

Abbildung A-127: Probe D30; ETP; Ofen 15 Min./190°C 400-fach; BE

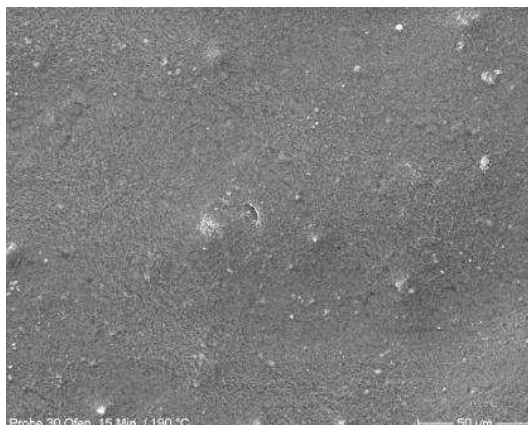


Abbildung A-128: Probe D30; ETP; Ofen 15 Min./190°C 400-fach; SE

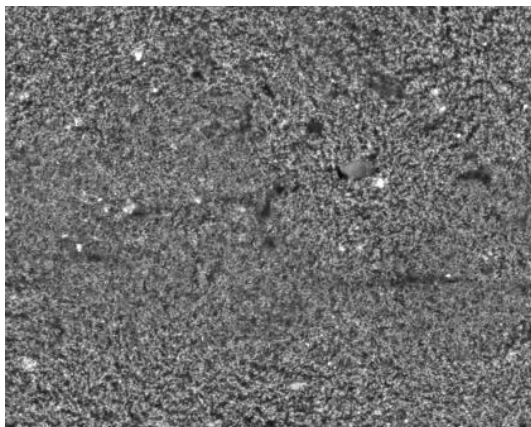


Abbildung A-129: Probe D30; ETP; Ofen 15 Min./190°C 1.000-fach; BE

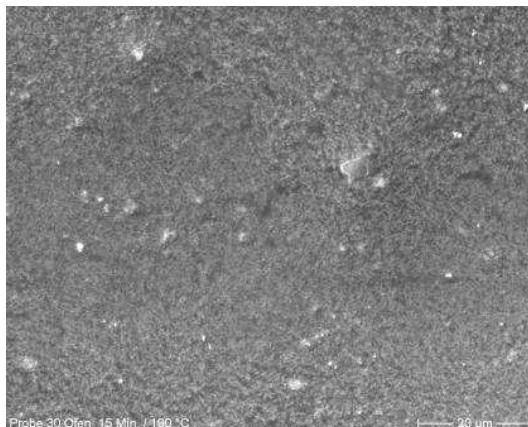


Abbildung A-130: Probe D30; ETP; Ofen 15 Min./190°C 1.000-fach; SE

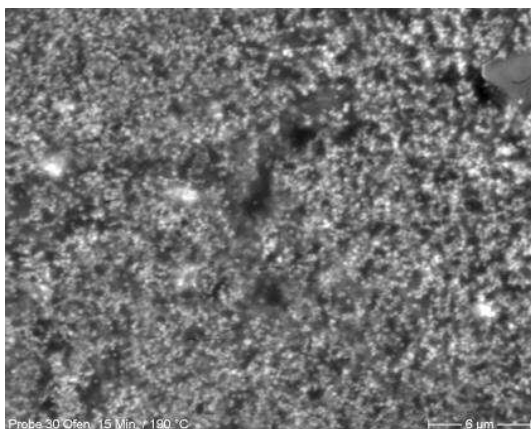


Abbildung A-131: Probe D30; ETP; Ofen 15 Min./190°C 3.000-fach; BE

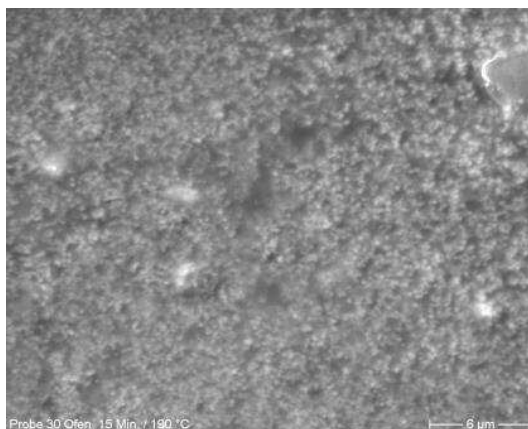


Abbildung A-132: Probe D30; ETP; Ofen 15 Min./190°C 3.000-fach; SE

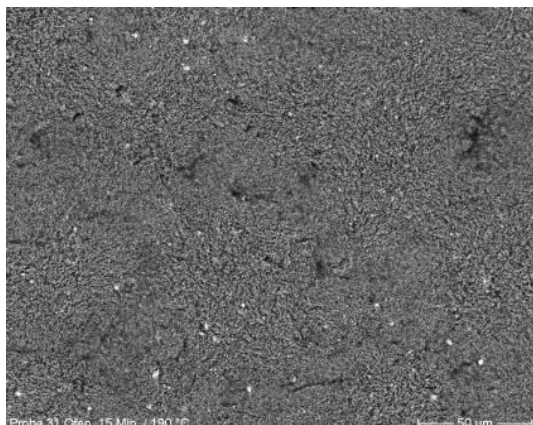
Probe D31: Ofen 15 Min./190°C ECCS

Abbildung A-133: Probe D31; ECCS; Ofen 15 Min./190°C 400-fach; BE

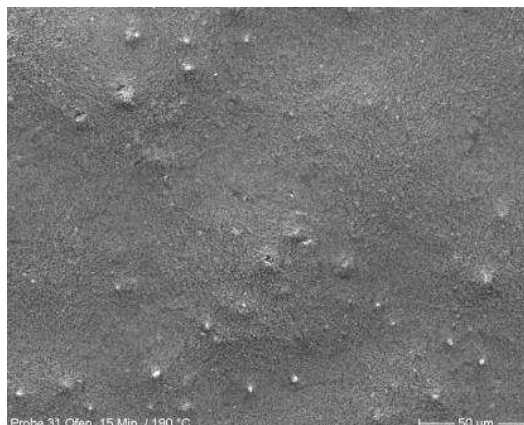


Abbildung A-134: Probe D31; ECCS; Ofen 15 Min./190°C 400-fach; SE

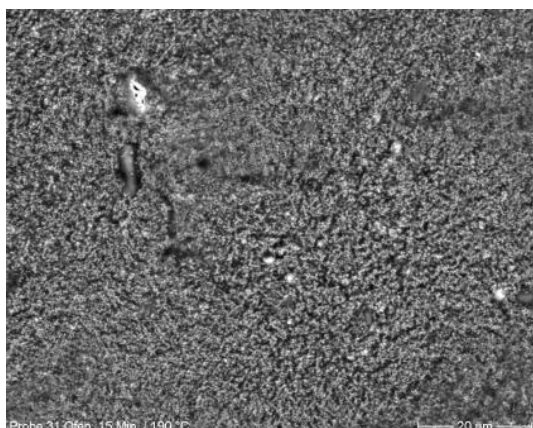


Abbildung A-135: Probe D31; ECCS; Ofen 15 Min./190°C 1.000-fach; BE

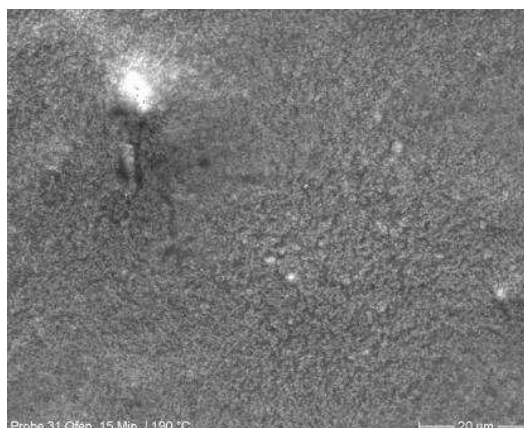


Abbildung A-136: Probe D31; ECCS; Ofen 15 Min./190°C 1.000-fach; SE

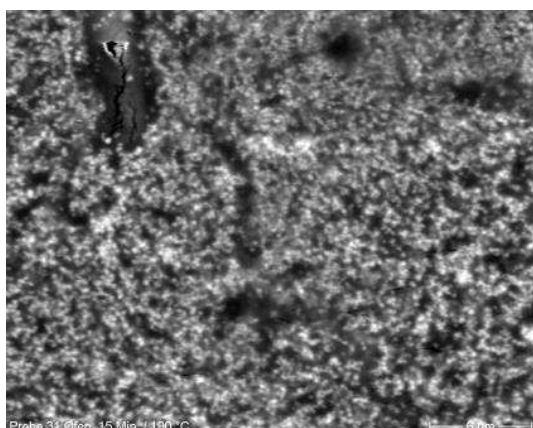


Abbildung A-137: Probe D31; ECCS; Ofen 15 Min./190°C 3.000-fach; BE

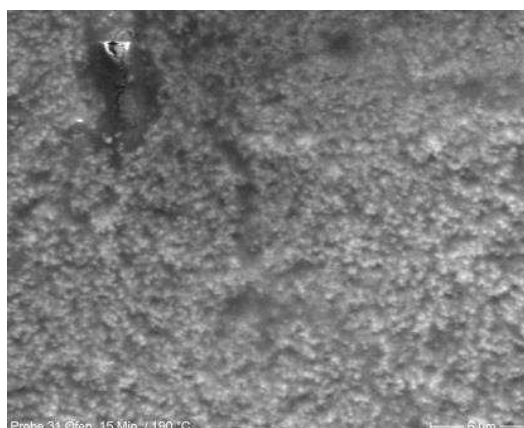


Abbildung A-138: Probe D31; ECCS; Ofen 15 Min./190°C 3.000-fach; SE

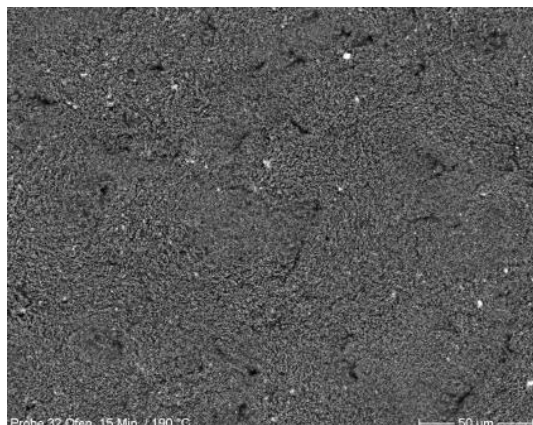
Probe D32: Ofen 15 Min./190°C CFPA

Abbildung A-139: Probe D32; CFPA; Ofen 15 Min./190°C 400-fach; BE

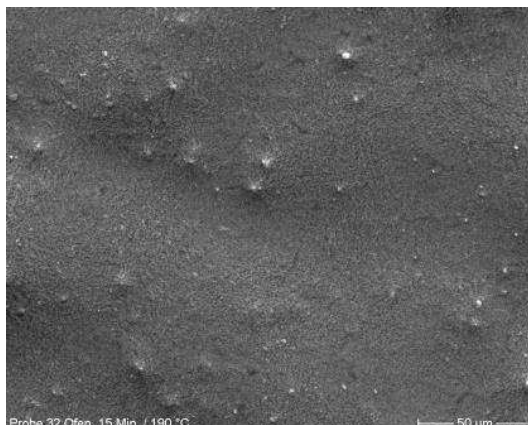


Abbildung A-140: Probe D32; CFPA; Ofen 15 Min./190°C 400-fach; SE

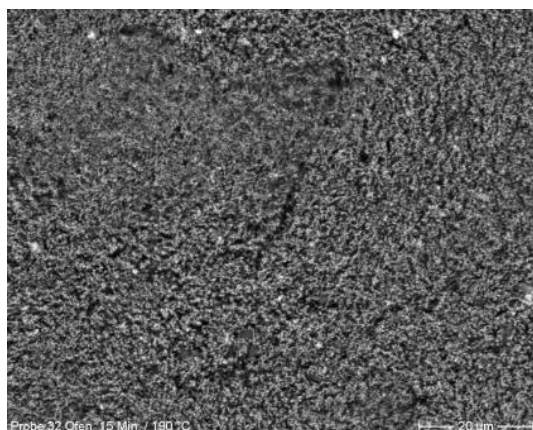


Abbildung A-141: Probe D32; CFPA; Ofen 15 Min./190°C 1.000-fach; BE

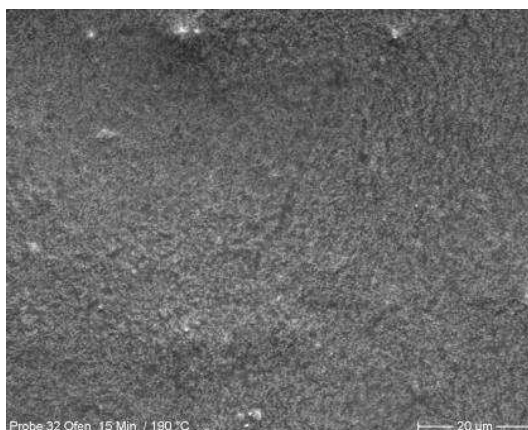


Abbildung A-142: Probe D32; CFPA; Ofen 15 Min./190°C 1.000-fach; SE

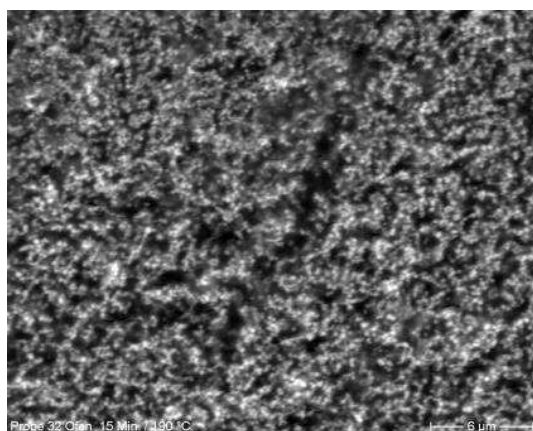


Abbildung A-143: Probe D32; CFPA; Ofen 15 Min./190°C 3.000-fach; BE

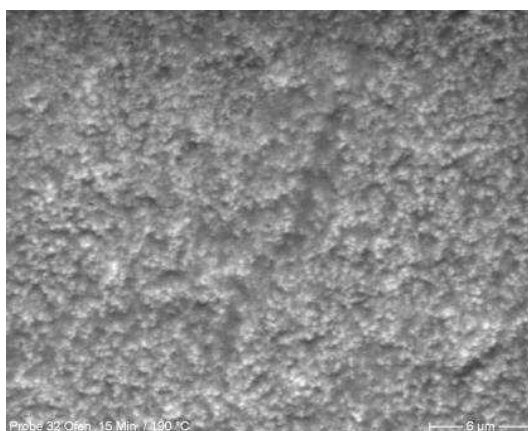


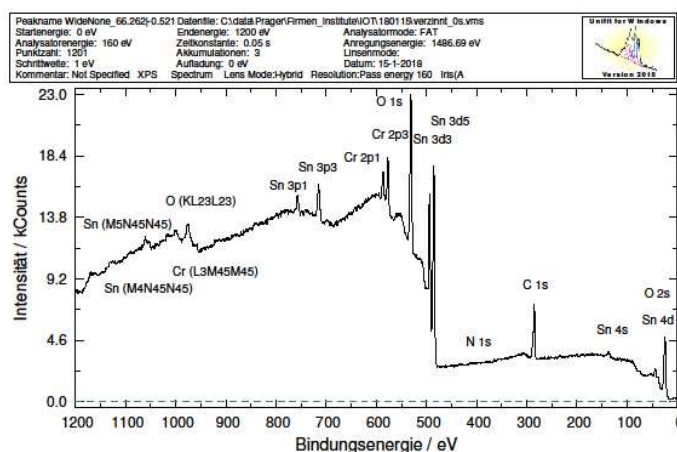
Abbildung A-144: Probe D32; CFPA; Ofen 15 Min./190°C 3.000-fach; SE

A.3 Ergebnisse der XPS-Analyse

Die XPS-Analysen wurden am Institut für Oberflächentechnologien in Leipzig durchgeführt.

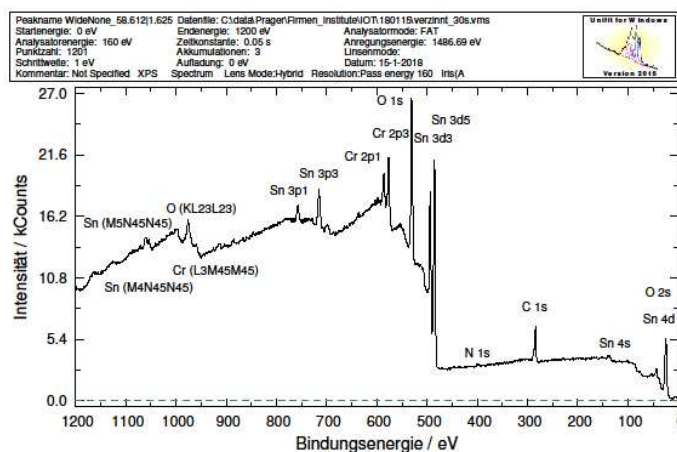
Die Diskussion der XPS-Analyse sind in Abschnitt 5.5.6 durchgeführt.

Probe E1: ohne Vorbehandlung



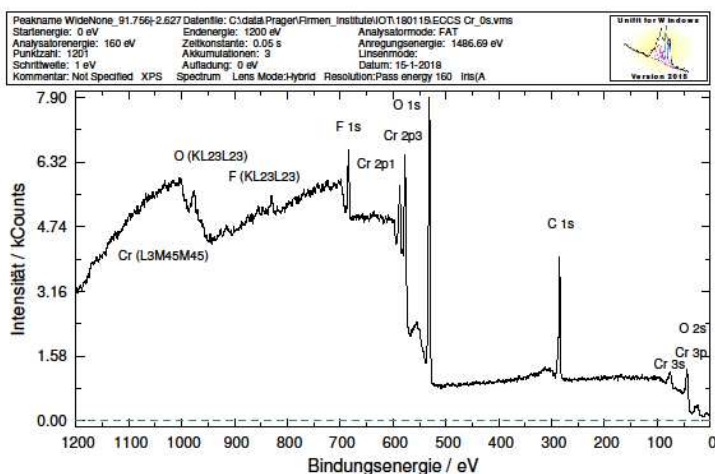
Peakname	Fläche/eV	Ebin/eV	Sigma	Lambda	TF	Empt.-Fakt.	Korr. Fläche	Konz./At.-%
Cr2p	31004.40244	577.5	11.67	16.48	1.006	193.47	163.2493458	7.59
O1s_Peak 1	4134.66614	530.08	2.93	17.12	1.003	50.312	82.18053176	3.89
O1s_Peak 2	36211.42663	531.7	2.93	17.1	1.003	50.253	720.5825847	34.13
O1s_Peak 3	9079.290438	533.55	2.93	17.07	1.003	50.155	190.5555551	9.04
Sn3d5_2	15235.63823	484.84	14.8	17.72	1	262.25	59.29413367	2.8
Sn3d5_2	43390.20717	486.56	14.8	17.7	1	261.96	165.6357558	7.84
N1s	0	404.7	1.8	18.76	0.999	33.532	0	0
C1s_Peak 1	6892.170185	285.25	1	20.29	0.974	19.762	348.7587382	16.52
C1s_Peak 2	5811.670720	286.84	1	20.27	0.975	19.763	294.0682447	13.93
C1s_Peak 3	1774.933486	289.32	1	20.24	0.975	19.734	89.94291510	4.26

Probe E1: mit 30 Sekunden Excimer-Vorbehandlung



Peakname	Fläche/eV	Ebin/eV	Sigma	Lambda	TF	Empt.-Fakt.	Korr. Fläche	Konz./At.-%
Cr2p	43040.25949	576.9	11.67	16.49	1.006	193.59	222.2324285	10.84
O1s_Peak 1	11006.35021	530.37	2.93	17.12	1.003	50.312	218.7619298	10.67
O1s_Peak 2	42659.56210	531.53	2.93	17.1	1.003	50.253	848.5952951	41.4
Sn3d5_2	16396.93944	484.82	14.8	17.72	1	262.25	62.52264752	3.05
Sn3d5_2	47473.65295	486.52	14.8	17.7	1	261.96	181.2248166	8.84
N1s	303.5645761	400.3	1.8	18.82	0.992	23.605	9.093315732	0.44
C1s_Peak 1	6007.780113	284.82	1	20.29	0.974	19.762	304.0066801	14.83
C1s_Peak 2	2192.640566	286.06	1	20.29	0.974	19.753	111.0029143	5.41
C1s_Peak 3	1821.406867	288.65	1	20.24	0.975	19.734	92.80464514	4.53

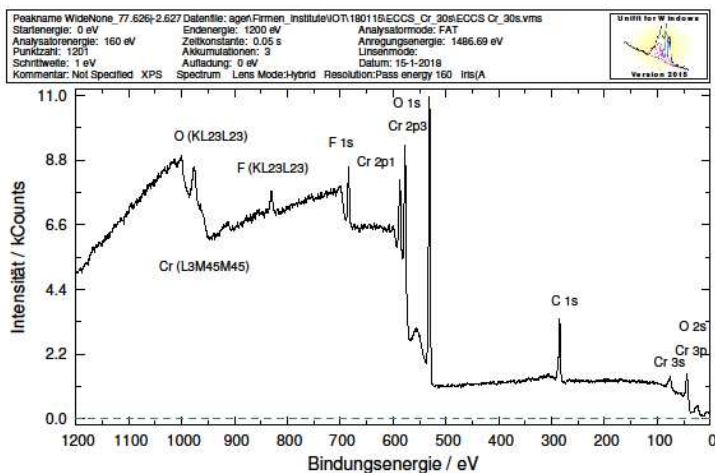
Probe E2: ohne Vorbehandlung



C:\data\PragerFirmen_Institute\IOT\180119\ECCS Cr_0s.vms
Geladene EF-Daten: AISofid.sen Geladene Transm.-Daten: AXISULTRA40slot_singlepeaks_30.lrm

Peakname	Fläche/ops-eV	Ebin/eV	Sigma	Lambda	TF	Emptl.-Fakt.	Korr. Fläche	Konz./At.-%
F1s	6028.537179	684.9	4.43	15.01	1.014	67.425	89.41100748	6.93 6.93
Cr2p Dublett 1	5167.682961	574.37	11.67	16.53	1.006	194.06	26.62989351	2.06 13.58
Cr2p Dublett 2	28740.85182	578.06	11.67	16.48	1.006	193.47	148.5489592	11.52
O1s Peak 1	1740.085129	533.44	2.93	17.11	1.003	50.253	34.69602222	2.68 43.43
O1s Peak 2	17906.75393	532.02	2.93	17.09	1.003	50.224	356.5377894	27.64
O1s Peak 3	8488.335949	533.36	2.93	17.08	1.003	50.196	169.1191542	13.11
C1s Peak 1	6541.302580	285.47	1	20.25	0.974	19.753	280.5600466	21.75 36.04
C1s Peak 2	2643.186545	286.42	1	20.27	0.975	19.763	133.7441960	10.37
C1s Peak 3	997.9135375	289.31	1	20.24	0.975	19.734	50.56823439	3.92

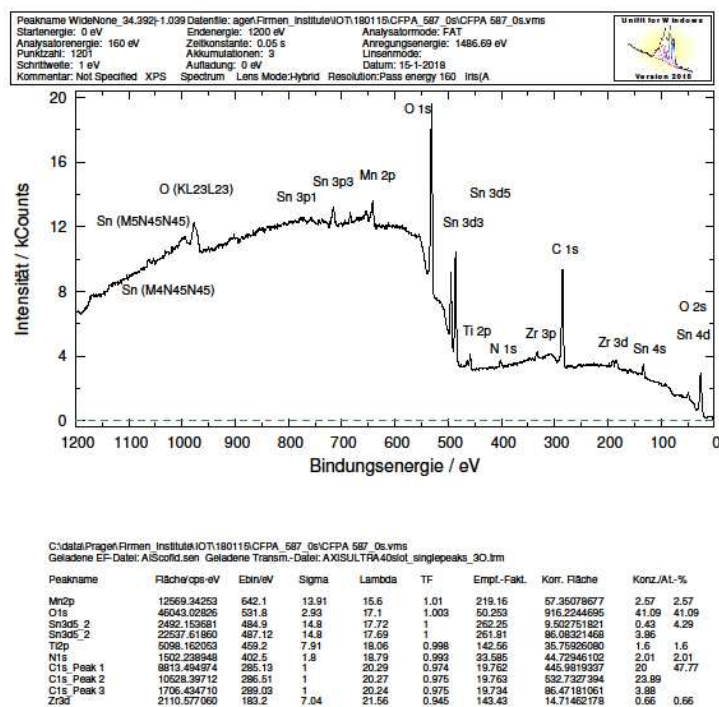
Probe E2: mit 30 Sekunden Excimer-Vorbehandlung



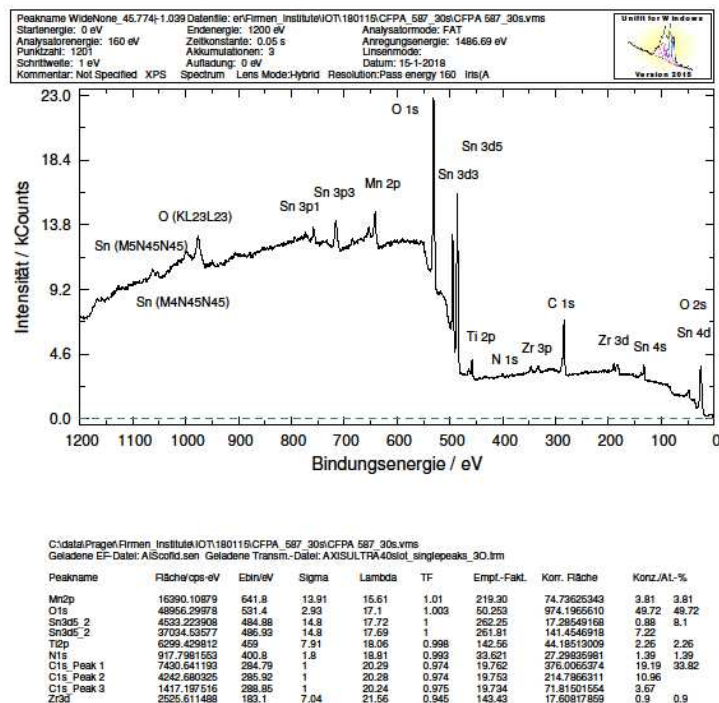
C:\data\PragerFirmen_Institute\IOT\180119\ECCS Cr_30s\ECCS Cr_30s.vms
Geladene EF-Daten: AISofid.sen Geladene Transm.-Daten: AXISULTRA40slot_singlepeaks_30.lrm

Peakname	Fläche/ops-eV	Ebin/eV	Sigma	Lambda	TF	Emptl.-Fakt.	Korr. Fläche	Konz./At.-%
Cr2p Dublett 1	5162.766201	574.21	11.67	16.53	1.005	193.87	26.62999020	2.07 17.36
Cr2p Dublett 2	37994.56768	577.92	11.67	16.48	1.006	193.47	196.3787120	16.29
O1s Peak 1	2344.686247	530.32	2.93	17.12	1.003	50.512	45.60137298	3.63 49.15
O1s Peak 2	19771.89285	531.88	2.93	17.1	1.003	50.253	393.4470151	30.63
O1s Peak 3	9600.406488	533.08	2.93	17.08	1.003	50.196	191.2622071	14.89
C1s Peak 1	4453.609588	285.24	1	20.25	0.974	19.752	225.3622905	17.54 25.13
C1s Peak 2	1022.582783	286.67	1	20.27	0.975	19.763	51.74228525	4.03
C1s Peak 3	901.6212911	289.14	1	20.24	0.975	19.734	45.68872459	3.56
F1s	7248.001985	684.9	4.43	15.01	1.014	67.425	107.4972485	8.37 8.37

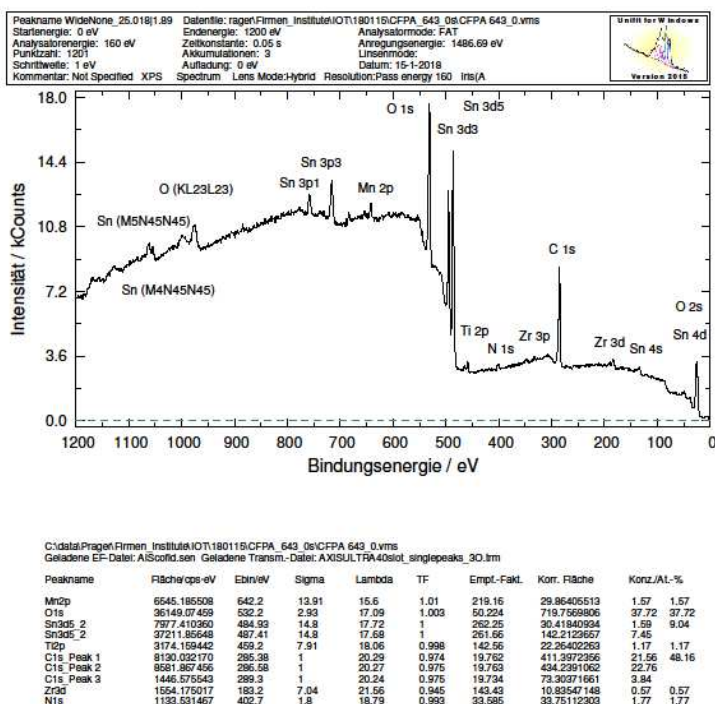
Probe E3: ohne Vorbehandlung



Probe E3: mit 30 Sekunden Excimer-Vorbehandlung



Probe E4: ohne Vorbehandlung



Probe E4: mit 30 Sekunden Excimer-Vorbehandlung

